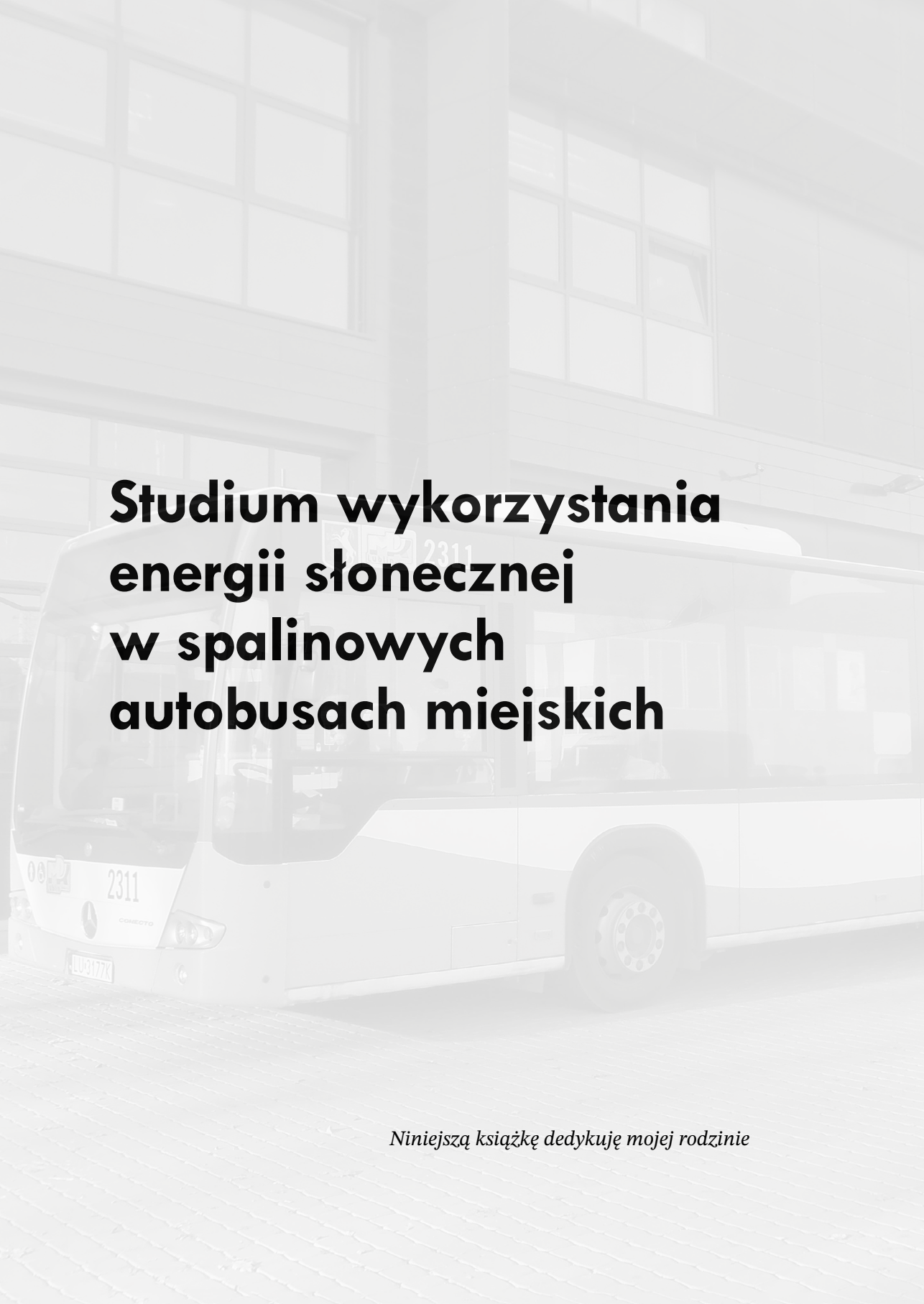


Studium wykorzystania energii słonecznej w spalinowych autobusach miejskich

Michał Jan Gęca





Studium wykorzystania energii słonecznej w spalinowych autobusach miejskich

Niniejszą książkę dedykuję mojej rodzinie

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:

Agnieszka Rzepka

Dyrektor CINT:

Katarzyna Weinper

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena Chołojczyk

Karolina Famulska-Ciesielska

Katarzyna Pełka-Smętek

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna Dudzińska

Małgorzata Franus

Arkadiusz Gola

Beata Kowalska

Grzegorz Komarzyniec

Anna Kuczmazewska

Jarosław Latański

Tomasz Lipecki

Zbigniew Łagodowski

Lucjan Pawłowski

Natalia Przesmycka

Halina Rarot

Magdalena Rzemieniak

Arkadiusz Syta

Studium wykorzystania energii słonecznej w spalinowych autobusach miejskich

Michał Jan Gęca



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Lublin 2025

RECENZENCI:

prof. dr hab. inż. **Jerzy Merkisz**, Politechnika Poznańska

dr hab. inż. **Mikołaj Bartłomiejczyk**, prof. PG, Politechnika Gdańska

AUTOR:

dr inż. **Michał Jan Gęca**, ORCID: 0000-0001-6484-7196

Politechnika Lubelska – ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

Redaktor prowadzący: **Magdalena Chołojczyk**

Korekta językowa: **Stanisław Powala-Niedźwiecki**

Skład i łamanie: **Katarzyna Pełka-Smętek**

Projekt graficzny serii: **Łukasz Maj**

Zdjęcie na okładce i stronie przedtytułowej zostało wykonane przez autora.

O ile nie wskazano inaczej, ryciny stanowią opracowanie własne autora.

Publikacja wydana za zgodą **Rrektora Politechniki Lubelskiej**

ISBN: 978-83-7947-625-1 (wersja drukowana)

ISBN: 978-83-7947-626-8 (wersja elektroniczna)

DOI: 10.35784/9788379476268

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.wpl.pollub.pl
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Wykaz symboli i skrótów	9
1. Wprowadzenie	11
2. Cel i zakres pracy	13
3. Tło badania i znaczenie tematu	15
3.1. Transport – zużycie paliwa i emisja CO ₂	15
3.2. Zużycie energii elektrycznej przez pojazd transportowy	24
3.3. Sprawność generowania energii elektrycznej w pojeździe	29
3.3.1. Alternator	29
3.3.2. Łańcuch strat w układzie generowania energii elektrycznej	31
3.3.3. Współczynnik G_{kWh}	33
3.4. Sposoby zmniejszania zużycia paliwa w środkach transportu	35
3.5. Słońce źródłem energii na Ziemi	38
4. Postawiona teza i zagadnienia badawcze	41
5. Energia słoneczna w transporcie	45
5.1. Pojazdy elektryczne i hybrydowe	45
5.2. Pojazdy z silnikiem spalinowym	49
5.3. Potencjalne korzyści i wyzwania	53
5.4. Pozycja Słońca i oświetlanego obiektu	55
5.5. Nierównomierność natężenia promieniowania słonecznego	60
6. Technologia paneli fotowoltaicznych	67
6.1. Budowa i zasada działania	67
6.2. Rodzaje ogniw fotowoltaicznych	69
6.3. Analiza dostępnych rozwiązań ogniw fotowoltaicznych	71
6.3.1. Krzemowe ogniwa krystaliczne	71
6.3.2. Ogniwa cienkowarstwowe	73
6.3.3. Ogniwa wielozłączowe	78
7. Baza danych i metoda pomiaru natężenia promieniowania	81
7.1. Przepływ światła słonecznego przez atmosferę	81
7.2. Wybór bazy danych	86
7.2.1. Metody tworzenia baz danych	86
7.2.2. Typowe lata meteorologiczne wg ISO	88
7.2.3. Fotowoltaiczny system informacji geograficznej PVGIS	93
7.2.4. Porównanie danych ISO o PVGIS	96
7.2.5. Porównanie danych PVGIS oraz rzeczywistych pomiarów	101
7.3. Metodologia pomiaru natężenia promieniowania słonecznego	105
7.4. Narzędzia i przyrządy pomiarowe	107

8. Model matematyczny pojazdowego systemu fotowoltaicznego	113
8.1. Struktura modelu	113
8.2. Budowa modelu na podstawie lokalizacji geograficznej	115
8.3. Wpływ napromieniowania i temperatury otoczenia	117
8.4. Zakłócenia w oświetleniu i ich wpływ na model	121
8.5. Wpływ prędkości jazdy	126
8.6. Wyznaczanie strumienia energii dla modułów fotowoltaicznych	134
9. Analiza energetyczna czterech autobusów miejskich	141
9.1. Selekcja autobusów do badań	141
9.2. Porównanie z obiektem nieruchomym	143
9.3. Porównanie podmodeli napromieniowania i przebiegu	145
9.3.1. Definicja i założenia podmodeli	145
9.3.2. Wyniki badań oparte na danych z czterech autobusów	147
9.3.3. Interpretacja i dyskusja wyników	151
9.4. Zużycie energii elektrycznej	154
10. Praktyczne wykorzystanie energii słonecznej w autobusie miejskim	157
10.1. Projekt systemu PV dla autobusu miejskiego	157
10.2. Efektywność i wpływ na pojazd	163
10.3. Wyzwania i rekomendacje dla praktycznego wdrożenia	167
10.3.1. Układ sterowania	167
10.3.2. Sprawność technologii fotowoltaicznej	168
10.3.3. Gęstość mocy i moc właściwa systemu fotowoltaicznego	173
10.3.4. Certyfikacja systemu i dopuszczenie do ruchu	175
10.3.5. Analiza ekonomiczna	175
11. Podsumowanie i wnioski	179
11.1. Główne wnioski z przeprowadzonych badań	179
11.2. Potencjalne kierunki dalszych badań	182
Załączniki	185
Z1. Autobusowy system pomiarowy	185
Z2. Skrypt do obliczania sumy natężenia promieniowania słonecznego	190
Z3. Skrypt do analizy plików autobusowych	190
Bibliografia	195

Studium wykorzystania energii słonecznej w spalinowych autobusach miejskich

W niniejszej pracy został przedstawiony oraz oceniony potencjał wykorzystania energii słonecznej w wybranych środkach transportu w celu zminimalizowania zużycia paliwa i emisji substancji toksycznych. Głównym celem monografii było opracowanie matematycznego modelu przebiegu oświetlenia dachu autobusu jako praktycznego narzędzia do planowania efektywności technologii fotowoltaicznej dla konkretnego pojazdu poruszającego się w określonej lokalizacji. Na podstawie geograficznego położenia, oszacowania dostępności światła słonecznego, zakłóceń w oświetleniu dachu autobusu oraz nieregularności w eksploatacji pojazdu modelowo określono ilość energii elektrycznej wytwarzanej przez moduły fotowoltaiczne. Postawiono hipotezę, że system fotowoltaiczny umieszczony na płaskim dachu autobusu miejskiego w Lublinie, położonym na 22°34'E, 51°15'N (wschodnia Polska), otrzymuje mniejszą ilość energii słonecznej niż system umieszczony na otwartej, niezacienionej przestrzeni.

W pracy przeprowadzono analizę dostępnych rozwiązań paneli fotowoltaicznych do zastosowania w motoryzacji. Wybrano bazę danych i metodę pomiaru całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie). Określono ilość energii słonecznej docierającej do czterech różnych autobusów miejskich i porównano ją z wartościami uzyskanymi dla nieruchomego obiektu z uwzględnieniem zmienności czasowej: rok, pora roku, miesiąc, dzień i pora dnia. Porównano roczną redukcję napromieniowania słonecznego w dwóch podmodelach: maksymalnego nasłonecznienia i przebiegu, która wyniosła odpowiednio 19% i 31%. Podmodele oparto na szeregach czasowych danych pomiarowych z czterech autobusów miejskich.

W ostatniej części pracy dokonano analizy wykorzystania energii słonecznej w systemie fotowoltaicznym zainstalowanym na dachu autobusu miejskiego. Zmierzona zielona energia produkowana z systemu fotowoltaicznego na pokładzie autobusu krótkiego i długiego zastąpiła odpowiednio 10% (398 kWh) i 27% (1261 kWh) energii produkowanej z energii chemicznej paliwa w alternatorach. W kontekście proponowanego rozwiązania dla pojazdów elektrycznych system ten pozwoli na zwiększenie ich zasięgu.

Słowa kluczowe: energia słoneczna, autobus, suma natężenia promieniowania słonecznego, system fotowoltaiczny, zacinienie, testy drogowe

Study of the use of solar energy in combustion city buses

This paper presents and evaluates the potential of using solar energy in selected transportation vehicles to minimize fuel consumption and toxic emissions. The main objective of the monograph was to develop a mathematical model of the course of bus roof lighting as a practical tool for planning the efficiency of photovoltaic technology for a specific vehicle operating in a specific location. Based on geographic location, estimation of sunlight availability, interference with bus roof lighting and irregularities in vehicle operation, the amount of electricity generated by photovoltaic modules was modeled. It was hypothesized that a photovoltaic system placed on the flat roof of a city bus in Lublin, located at 22°34'E, 51°15'N (eastern Poland), receives less solar energy than a system placed in an open, unshaded area.

The paper analyzes available photovoltaic panel solutions for automotive applications. A database and a method for measuring total solar irradiance (irradiance) were selected. The amount of solar energy reaching four different city buses was determined and compared with the values obtained for a stationary object, taking into account the time variation: year, season, month, day and time of day. The annual reduction in solar irradiance was compared in two submodels: maximum solar irradiance and mileage, which amounted to 19% and 31%, respectively. The submodels were based on time series of measured data from four city buses.

The final part of the study analyzed the use of solar energy in a photovoltaic system installed on the roof of a city bus. The measured green energy produced from the photovoltaic system on board the short and long buses replaced 10% (398 kWh) and 27% (1261 kWh) of the energy produced from fuel chemical energy in the alternators, respectively. In the context of the proposed solution for electric vehicles, this system will allow them to increase their range.

Keywords: solar energy, bus, total solar irradiance, photovoltaic system, shading, road tests

Wykaz symboli i skrótów

A	– powierzchnia [m^2]
AC	– prąd przemienny [A]
AM	– współczynnik masy powietrza
$ASTM$	– Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów
E_{el}	– energia elektryczna [Wh]
E	– natężenie promieniowania słonecznego [W/m^2]
$ETFE$	– folia z kopolimeru etylenu i żywicy tetrafluoroetylenowej
EVA	– folia na bazie octanu etylenowo-winyłowego
G	– całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [W/m^2]
G_0	– natężenie promieniowania słonecznego docierające do górnej granicy atmosfery [W/m^2]
G_b	– bezpośrednie natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [W/m^2]
G_d	– rozproszone natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [W/m^2]
GHG	– gazy cieplarniane (ang. <i>greenhouse gas</i>)
G_{kWh}	– objętość paliwa przeznaczona do wytworzenia 1 kWh E_{el} [dm^3/kWh]
GPS	– system nawigacji satelitarnej
H	– suma całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) [kWh/m^2]
H_b	– suma bezpośredniego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (napromieniowanie) [kWh/m^2]
H_d	– suma rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (napromieniowanie) [kWh/m^2]
H_β	– suma całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię nachyloną pod kątem β (napromieniowanie) [kWh/m^2]
I	– natężenie prądu [A]
$Ideal1$	– podmodel biorący pod uwagę największą wartość napromieniowania
$Ideal2$	– podmodel biorący pod uwagę największą wartość przebiegu dziennego
I_{mpp}	– nominalne natężenie prądu modułu fotowoltaicznego [A]
I_{sc}	– prąd zwarcia modułu fotowoltaicznego [V]
ISO	– Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
kT	– indeks przejrzystości atmosfery
$MPPT$	– poszukiwania optymalnego punktu pracy ogniwa fotowoltaicznego
N	– usłonecznienie [h]
$NOCT$	– temperatura ogniwa fotowoltaicznego w normalnych warunkach pracy [$^{\circ}\text{C}$]
ON	– olej napędowy
P	– ciśnienie [Pa]
P_m	– moc modułu fotowoltaicznego [W]
P_{MPP}	– temperaturowy współczynnik mocy ogniwa fotowoltaicznego [$\%/^{\circ}\text{C}$]
P_{rated}	– znamionowa moc elektryczna [W]

P_{PV}	– moc systemu fotowoltaicznego
PV	– fotowoltaika
$PVGIS$	– fotowoltaiczny system informacji graficznej
STC	– standardowe warunki pomiarowe ogniw fotowoltaicznych
T	– temperatura [°C]
t	– czas [s]
TPE	– tylna warstwa z elastomeru termoplastycznego
U	– napięcie (V)
UV	– promieniowanie ultrafioletowe
V_{mpp}	– nominalne napięcie modułu fotowoltaicznego [V]
V_{oc}	– napięcie obwodu otwartego modułu fotowoltaicznego [V]
ZI	– zapłon iskrowy
ZS	– zapłon samoczynny
β	– kąt nachylenia płaszczyzny względem powierzchni Ziemi
ε	– jasność nieba
$\zeta(q)$	– wykładnik skalowania w analizie multifraktalnej
η	– sprawność
θ	– kąt padania promieni słonecznych
θ_z	– kąt zenitalny

Indeksy

cell	– ogniwo fotowoltaiczne
el	– elektryczna
m	– moduł fotowoltaiczny
max	– maksymalna
mean	– średnia

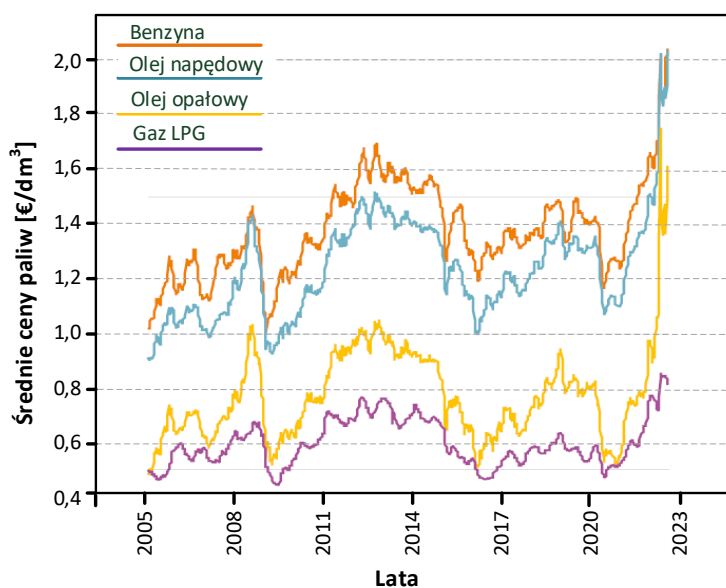
1. Wprowadzenie

Autobusy miejskie, choć istotne w kontekście transportu publicznego, stanowią stosunkowo niewielki odsetek globalnego zużycia paliwa w transporcie drogowym. Główne czynniki wpływające na tę sytuację obejmują ograniczone zakresy i godziny działania w porównaniu z innymi pojazdami, takimi jak samochody osobowe czy ciężarówki. Ponadto rosnące zainteresowanie pojazdami elektrycznymi i hybrydowymi w transporcie publicznym zmniejsza zależność od paliw kopalnych. Niemniej autobusy miejskie są kluczowym elementem w dążeniu miast do zrównoważonego rozwoju i zmniejszenia ogólnego śladu węglowego transportu.

Sektor transportu jest kluczowy dla rozwoju ekonomicznego i miejskiego. Ma również znaczący wpływ na jakość życia w mieście. Obecnie kładzie się duży nacisk na stosowanie ekologicznych i ekonomicznych środków transportu w ruchu miejskim. Autobusy miejskie muszą spełniać normy emisji Euro VI. Przedsiębiorstwa transportowe są dzisiaj zmuszane do wykorzystania wszystkich możliwości redukcji zużycia paliwa w celu utrzymania swojej konkurencyjności.

Floty transportowe poszukują ekonomicznych środków transportu, autobusów i ciężarówek o niskim zużyciu paliwa i niskich kosztach eksploatacji. Głównym czynnikiem ekonomicznym jest korzyść finansowa dla pierwszego właściciela pojazdu, wynikająca z oszczędności na kosztach paliwa. Można to osiągnąć tylko wtedy, gdy jest ona większa niż dodatkowa inwestycja

początkowa w bardziej wydajny pojazd w porównaniu z produktami standardowymi. Dodatkowe części lub bardziej kosztowne komponenty, ulepszone w celu zmniejszenia zużycia energii, są zazwyczaj niezbędne do osiągnięcia oszczędności. W przypadku ciężarówek i autobusów stosuje się owiewki aerodynamiczne, skrzynie biegów o zmniejszonym tarcu, poprawioną sprawność silnika, ograniczenie prędkości do 80 km/h i opony o niskich oporach toczenia, które mogą osiągnąć zwrot inwestycji w akceptowalnym okresie. Dla typowych klientów w Europie Zachodniej wynosi on dla ciężarówek używanych do celów komercyjnych od 1,5 do 3 lat. Wysokie ceny oleju napędowego sprzyjają skróceniu okresu zwrotu inwestycji. Antycypacja właścicieli pojazdów w zakresie przyszłych kosztów paliwa jest dodatkowym czynnikiem wpływającym na możliwości rynkowe urządzeń energooszczędnych. Na rycinie 1.1 przedstawiono średnie ceny paliw w krajach Unii Europejskiej razem ze wszystkimi podatkami. Od 2022 roku ceny paliw rosną. W związku z tym łatwiej jest sprzedawać elementy zwiększające wydajność energetyczną pojazdów zużywających paliwo, ponieważ okres zwrotu inwestycji staje się coraz krótszy.



Ryc. 1.1. Zmiany w czasie średnich cen paliw do środków transportu w krajach Unii Europejskiej uwzględniające podatki. Na podstawie [71]

2. Cel i zakres pracy

Celem monografii będzie opracowanie modelu matematycznego przebiegu czasowego oświetlenia dachu autobusu. Model ten będzie zawierał elementy stochastyczne, uwzględniające ukryte powiązania pomiędzy porą dnia, trasą autobusu i lokalizacją geograficzną a wielkością strumienia energii świetlnej docierającej do dachu autobusu.

Celem praktycznym monografii będzie opracowanie narzędzia do planowania skuteczności zastosowania technologii fotowoltaicznej dla konkretnego autobusu poruszającego się w konkretnej lokalizacji. Na podstawie geograficznej lokalizacji i oszacowania dostępności światła słonecznego, zakłóceń w oświetlaniu dachu autobusu i nieciągłości eksploatacyjnej pojazdu zostanie modelowo wyznaczony strumień energii elektrycznej wytwarzanej przez moduły fotowoltaiczne.

Warto podkreślić, że większość badań nad natężeniem promieniowania słonecznego dotyczy stacjonarnych obiektów. Rozwinięcie badań nad dostępnością energii słonecznej podczas ruchu pojazdu w mieście jest istotne ze względu na brak wystarczającej bazy danych empirycznych o promieniowaniu słonecznym w obszarach miejskich.

W pracy:

- przedstawiona zostanie konieczność instalacji dodatkowego źródła energii w autobusie miejskim,

- przeprowadzona zostanie analiza dostępnych technologii fotowoltaicznych,
- dokonane będzie porównanie i wybór do analizy źródła sumy całkowitego natężenia promieniowania słonecznego,
- opracowany zostanie szczegółowy model stochastycznego systemu fotowoltaicznego dla pojazdu.

3. Tło badania i znaczenie tematu

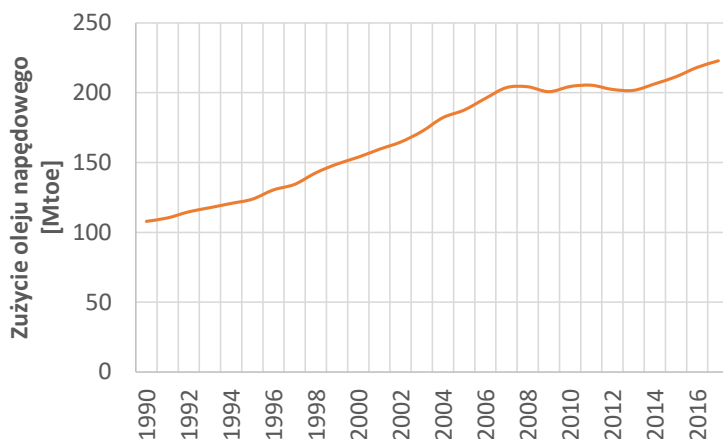
3.1. Transport – zużycie paliwa i emisja CO₂

Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego, bazując na danych z Centralnej Ewidencji Pojazdów, informuje, że do końca 2018 roku w Polsce zarejestrowanych było 345 tysięcy ciągników siodłowych o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 16 ton oraz 80 tysięcy autobusów. W ostatnich trzech latach rejestrowanych jest średnio około 25 tysięcy nowych ciężarówek i 23 tysięcy nowych autobusów. Z kolei Międzynarodowy Związek Transportu Publicznego przekazuje, że 50 największych miejskich przedsiębiorstw przewozowych dysponuje flotą około 55 tysięcy autobusów. Co roku 5 największych europejskich producentów dostarcza na rynek 12 tysięcy autobusów miejskich.

Według prognozy Międzynarodowej Agencji Energii globalne zapotrzebowanie na energię wzrośnie z 13 miliardów ton ekwiwalentu ropy naftowej w 2016 roku do 17 miliardów ton w 2035 roku. Pomimo wprowadzenia nowych regulacji przewiduje się wzrost emisji z 32 miliardów ton w 2016 roku do 35 miliardów ton w 2035 roku. Sektor transportowy odpowiada za około jedną czwartą globalnych emisji, osiągając poziom około 8 miliardów ton w 2016 roku, z czego ponad 74% (6 miliardów ton) pochodzi z transportu drogowego [114]. Prognozy wskazują, że do 2040 roku światowe zapotrzebowanie na energię wzrośnie o około 40%. Dominującymi paliwami w sektorze transportowym pozostają benzyna, olej napędowy oraz paliwa gazowe, takie

jak LPG i CNG, które będą stanowiły 88% całkowitego zapotrzebowania na energię do 2050 roku [229].

Na rycinie 3.1 przedstawiono zużycie oleju napędowego razem z biokomponentami przez sektor transportu w krajach Unii Europejskiej (UE). W analizowanym sektorze znajdują się autobusy oraz ciężarówki. Wartości podano w tonach oleju ekwiwalentnego, która jest energetycznym równoważnikiem jednej metrycznej tony ropy naftowej o wartości opałowej równej 10 tys. kcal/kg. W 2017 roku eksploatacja pojazdów ciężarowych i autobusów w UE zużyła 15% zapotrzebowania na ropę naftową, przy czym około 9/10 pochodziło z importu i przyczyniło się do wygenerowania 6% całkowitych emisji gazów cieplarnianych [217]. Ograniczenie emisji całkowitej FC (ang. *carbon footprint*) i gazów cieplarnianych GHG (ang. *greenhouse gas*) jest konieczne ze względów ekonomicznych i ekologicznych. Ponadto zmniejszyłaby się silna zależność od eksporterów ropy naftowej [72].



Ryc. 3.1. Przebieg średniej sumy rocznej zużycia oleju napędowego razem z biokomponentami przez sektor transportu w krajach Unii Europejskiej. Na podstawie [72]

Zużycie paliwa koreluje bezpośrednio z ilością emitowanego dwutlenku węgla CO_2 , będącego głównym składnikiem gazów cieplarnianych. Na każdy dm^3 zużytego oleju napędowego przypada około 2,6 kg wyemitowanego CO_2 . Emisja CO_2 jest wynikiem mnożenia zawartej w paliwie energii przez wartość jednostkową emisji dla oleju napędowego. Wskaźniki emisji (73,33 kg/GJ) oraz wartości opałowe oleju napędowego (43,33 MJ/kg) zostały zawarte w raporcie Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu IPCC [107].

W kontekście obecnego globalnego ocieplenia klimatolodzy są jednomyślni co do tego, że ponad połowa wzrostu temperatury od czasu uprzemysłowienia

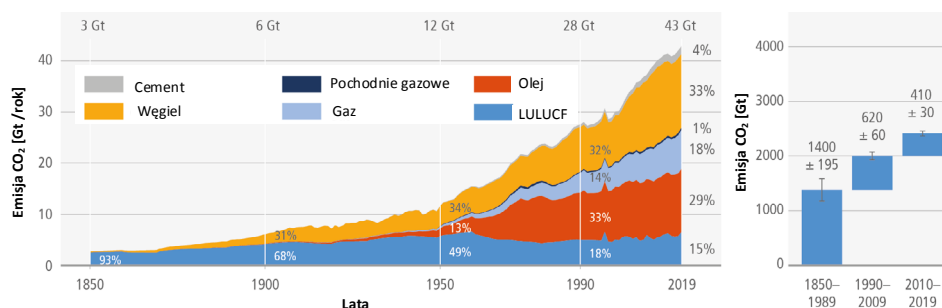
jest wynikiem antropogenicznego efektu cieplarnianego [44], [151], [28], [160], [171], [230]. Efekt cieplarniany oraz związane z nim globalne ocieplenie oznaczają, że krótkofalowe światło emitowane przez Słońce przenika do atmosfery, a jego część jest odbijana od powierzchni Ziemi w postaci długofalowego promieniowania podczerwonego [200]. Stosunek ilości promieniowania odbitego do padającego na Ziemię to tzw. albedo Ziemi. Główne składniki gazów cieplarnianych, takie jak dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), podtlenek azotu (N_2O), ozon (O_3) i para wodna (H_2O), absorbują część promieniowania, co sprawia, że stają się cieplejsze. Im większa zawartość GHG w atmosferze, tym więcej promieniowania jest absorbowane. Jednym z wielu dowodów na obecność efektu cieplarnianego jest to, że w długościach fal, które są częściowo absorbowane przez CO_2 i CH_4 , emitowana ilość energii promieniowania jest mniejsza niż w innych długościach fal, co potwierdzają pomiary satelitarne [102], [39].

Ponadto istnieje wiele pozytywnych i kilka negatywnych skutków sprzężenia zwrotnego. Jednym z przykładów jest dodatnie sprzężenie zwrotne klimatu między parą wodną a powietrzem [55]. Pojemność magazynowania powietrza dla pary wodnej rośnie wraz z temperaturą, co jest znane z termodynamiki [43], [24]. Same pary wodne są gazem cieplarnianym GHG [200]. W wyniku tych procesów atmosfera ulega ociepleniu, co prawdopodobnie jest procesem samonapędzającym się, a ponad 90% zaabsorbowanej energii przekazywane jest w postaci ciepła do chłodniejszej wody oceanu na jej powierzchni. Ma to wpływ na poziom morza, m.in. poprzez topnienie lodu z pokrywy lodowej i lodowców. Należy zauważyć, że większość ludności świata mieszka w regionach o ciepłym lub umiarkowanym klimacie, a duże miasta znajdują się w rejonach nadmorskich [210], [38]. Na tych obszarach będą się kumulować szkody ludzkie i materialne spowodowane ekstremalnymi warunkami pogodowymi i powodzią.

Na rycinie 3.2 przedstawiona jest globalna antropogeniczna emisja CO_2 pochodząca z przekształcania, użytkowania i zagospodarowania gruntów i lasów (LULUCF), spalania paliw kopalnych (węgiel, gaz, olej) oraz produkcji cementu i spalania w pochodniach (flarach) gazowych. W formie wąsów po prawej stronie przedstawiono zagregowany zakres niepewności na poziomie jednego odchylenia standardowego dla historycznych skumulowanych emisji. Od 1850 do 2019 roku do atmosfery zostało wyemitowane 2430 Gt CO_2 . Ponad połowa (62%) całkowitej emisji z lat 1850–2019 miała miejsce w 1970 roku (1500 ± 140 Gt CO_2), około 42% od 1990 roku (1000 ± 90 Gt CO_2) i około 17% od 2010 roku (410 ± 30 Gt CO_2) [36], [77], [78].

Od 1850 do około 1950 roku antropogeniczna emisja CO₂ pochodziła głównie (>50%) z LULUCF. W ciągu ostatniego półwiecza emisje CO₂ z tego źródła pozostały na względnie stałym poziomie, wynosząc około $5,1 \pm 3,6$ GtCO₂, ale z dużym rozrzutem w różnych szacunkach [77], [78], [126]. Natomiast globalne roczne emisje CO₂ ze spalania paliw kopalnych i procesów przemysłowych stale rosną od 1850 roku. Od lat 60. XX wieku ze średniej dekadowej $11 \pm 0,9$ GtCO₂ do $36 \pm 2,9$ GtCO₂ w latach 2010–2019. Paliwa płynne i stałe stanowiły 75,5% emisji pochodzących ze spalania paliw kopalnych i produkcji cementu w 2011 roku. Spalanie paliw gazowych (np. gazu ziemnego) stanowiło 18,6% (1760 mln ton metrycznych węgla) całkowitej emisji z paliw kopalnych w 2011 roku i odzwierciedlało stopniowo rosnące wykorzystanie gazu ziemnego na całym świecie. Emisje z produkcji cementu (491 mln ton metrycznych węgla w 2011 roku) wzrosły ponaddwukrotnie od końca lat 90. [141].

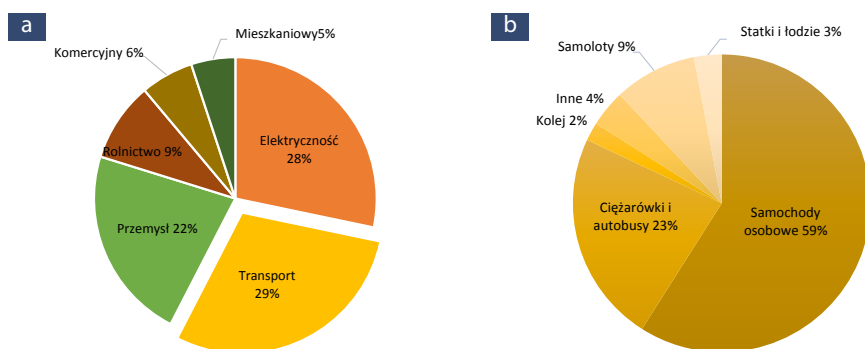
Około 40% antropogenicznego CO₂ pozostaje w atmosferze, 30% jest wchłonięte przez oceany, a 30% zgromadzone jest w roślinach i glebie. Przed industrializacją w atmosferze było około 300 ppmv CO₂, a naturalny cykl CO₂, wynoszący około 670 Gt/rok, tworzony przez rośliny, glebę i oceany jako źródła i odbiorniki był prawie zamknięty [200]. W 2019 roku 15% emisji CO₂ (8,7 Gt CO₂) pochodziło z sektora transportu. Jego średni roczny wzrost był najszybszy i wyniósł około 1,8% w okresie 2010–2019 [124], [141].



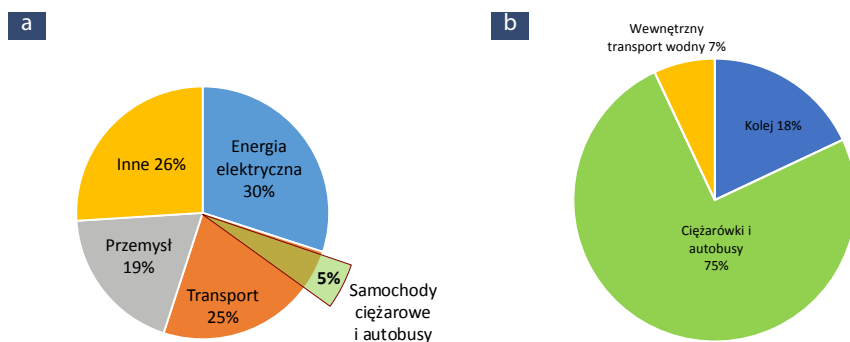
Ryc. 3.2. Historyczna antropogeniczna emisja CO₂ z poszczególnych źródeł i procesów (lewy) oraz skumulowana emisja CO₂ w latach 1850–2019 (prawy). W postaci „wiskerów” przedstawiono po prawej stronie zagregowany zakres niepewności na poziomie jednego odchylenia standardowego dla historycznych skumulowanych emisji CO₂. Na podstawie [78], [36]

Na rycinie 3.3 przedstawiono emisje gazów cieplarnianych według sektorów w USA z danych zgromadzonych przez amerykańską agencję ochrony środowiska (U.S. Environmental Protection Agency). Okazuje się, że w roku 2017 sektor transportu był odpowiedzialny za około 29% całkowitej emisji GHG, a wytwarzanie energii elektrycznej za 28%. Z tych 29% nieco mniej niż jedna

czwarta (23%) przypada na średnie i duże pojazdy ciężarowe (ryc. 3b) [213]. Z kolei na rycinach 3.4 a i b przedstawiono porównywalne dane z Unii Europejskiej [5]. Rycina 3.4b przedstawia natomiast udział transportu i pojazdów ciężarowych w emisji gazów cieplarnianych w Europie w podziale na środki transportu. Dane zostały opracowane na podstawie raportu Stowarzyszenia Europejskich Producentów Pojazdów (ACEA) [14]. W Europie transport generuje 25% emisji gazów cieplarnianych, a 5% całkowitej emisji – samochody ciężarowe HDV (ang. *heavy-duty vehicles*). W zależności od kraju Unii Europejskiej HDV stanowią od 17% do 100% udziału w lądowym transporcie towarów. Średnio w 75% jest to transport oparty na ciężarówkach [69], [216], [217]. Należy również podkreślić, że we flotach dużych autobusów przeznaczonych do transportu publicznego znaczną część stanowią pojazdy napędzane silnikami o zapłonie samoczynnym ZS, których emisja spalin skumulowana w niewielkich przestrzeniach miejskich istotnie przyczynia się do rozwoju chorób cywilizacyjnych.



Ryc. 3.3. Emisja gazów cieplarnianych (GHG) w USA w roku 2017 według sektorów (a) oraz z sektora transportu w podziale na rodzaje pojazdów (b). Na podstawie [213], [13]



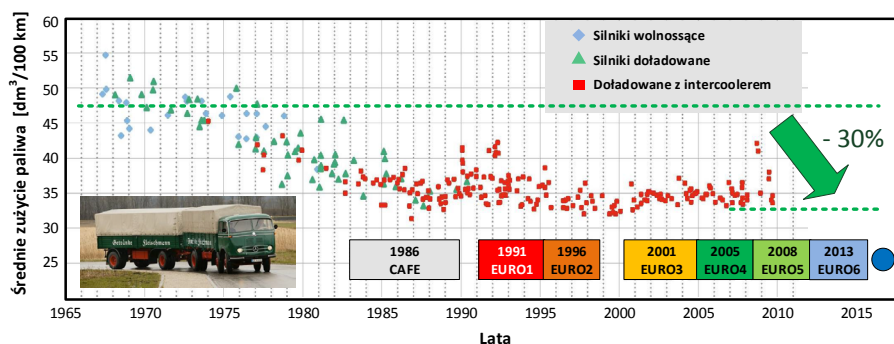
Ryc. 3.4. Emisja gazów cieplarnianych (GHG) w Europie według sektorów (b) oraz w podziale na środki transportu na podstawie raportu ACEA (a). Na podstawie [5]

Z kolei wyniki badania emisji gazów cieplarnianych (GHG) przeprowadzonego przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) w 2009 roku wykazały, że w 2007 roku emisja CO₂ wygenerowana przez światowy przemysł żeglugowy wynosiła około 1,046 mld ton, co stanowiło jedynie 3,3% całkowitej światowej emisji dwutlenku węgla [33].

Zgodnie z porozumieniem paryskim Unia Europejska wprowadziła regulacje mające zapewnić, że wszystkie sektory gospodarki przyczyniają się do dekarbonizacji. Do 2030 roku sektory nieobjęte systemem handlu uprawnieniami do emisji, takie jak transport, będą zobowiązane do ograniczenia emisji o 30% w porównaniu z danymi z 2005 roku. Komisja Europejska opracowała procedurę testową, wykorzystującą oprogramowanie VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool), w celu oszacowania zużycia paliwa i emisji CO₂ z nowych samochodów ciężarowych i autobusów. Rozporządzenie UE obejmuje certyfikację wszystkich nowo zarejestrowanych samochodów ciężarowych i autobusów. Metoda opiera się na pomiarze i certyfikacji elementów mających wpływ na poprawę sprawności pojazdu. Opracowane oprogramowanie VECTO modeluje zużycie energii i paliwa całego pojazdu, opierając się na danych pomiarowych i wykorzystując podejście rozszerzonej symulacji wstecznej [215]. Dzięki takiemu podejściu certyfikacyjnemu można modułowo łączyć pojedyncze odbiorniki mocy pojazdów silnikowych, co umożliwia łatwe tworzenie modeli kompletnych ciężarówek i autobusów oraz symulowanie wynikającego z tego zużycia paliwa i emisji CO₂.

Procedura testowa VECTO jest narzędziem symulacyjnym mającym na celu dostarczenie nabywcom samochodów ciężarowych i autobusów dokładnych informacji na temat zużycia paliwa.

Na rycinie 3.5. przedstawiono zużycie paliwa przez układy napędowe w autobusach i ciężarówkach w latach 1965–2010 uzyskane na podstawie badań magazynu LastAuto Omnibus. Opracowana analiza ma zastosowanie również do autobusów miejskich. Od roku 1965 średnie rzeczywiste zużycie paliwa w Unii Europejskiej zmniejszyło się o 30%. Na wykresie naniesiono jednocześnie daty wprowadzania norm emisji Euro. Silne działania mające na celu zmniejszenie emisji składników toksycznych spalin ograniczają dalszą poprawę oszczędności paliwa. Obecna norma emisji Euro VI zakłada zużycie paliwa na poziomie 26,9 dm³/100 km i muszą ją spełnić zarówno ciężarówki, jak i autobusy [189].



Ryc. 3.5. Zużycie paliwa przez europejskie ciężarówki i autobusy w latach 1965–2015 oraz wprowadzane normy emisji spalin uzyskane na podstawie rzeczywistych badań magazynu LastAuto Omnibus [189], [235]

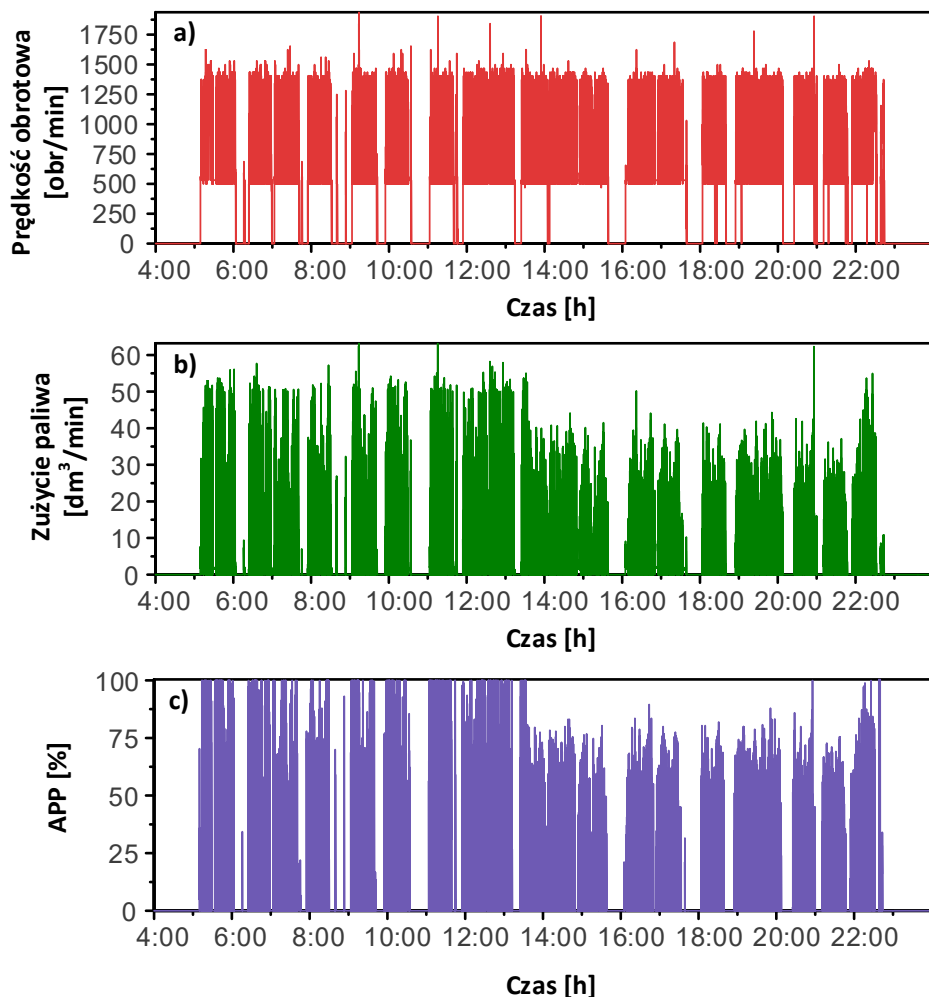
Zarówno Komisja Europejska, jak i Departament Energii Stanów Zjednoczonych podejmują działania dotyczące redukcji emisji CO₂. Celem tych działań jest zmniejszenie emisji tego gazu o co najmniej 60% do roku 2050 [196]. Od czasu ogłoszenia przez władze Stanów Zjednoczonych nowych celów dotyczących redukcji emisji CO₂ przez ich flotę Unia Europejska wywiera nacisk na działania związane z normami efektywności zużycia paliwa przez samochody ciężarowe i autobusy. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) zaproponowała obniżenie zużycia paliwa przez samochody ciężarowe i autobusy o 24% do 2027 roku w stosunku do limitów wprowadzonych w 2011 roku. Zgodnie z propozycją amerykańską pojazdy te do 2027 roku będą zużywać mniej niż 26,7 dm³/100 km i będą przewyższać europejskie normy zużycia paliwa wynoszące 32 dm³/100 km, jak pokazano na rycinie 3.5. EPA szacuje, że ten drugi etap wprowadzenia norm pozwoli właścicielom amerykańskich pojazdów transportowych zaoszczędzić 150 mld euro na kosztach paliwa w całym okresie eksploatacji pojazdów.

Zużycie paliwa w autobusach miejskich jest uzależnione od właściwości technicznych autobusu, warunków ruchu i stylu jazdy kierowcy. Z tego względu przeprowadza się testy jezdne, które przybliżają rzeczywiste użytkowanie autobusów, oraz ustala się ściśle określone wykonywanie pomiarów i realizację scenariuszy testów. Przykładem testu do badania autobusów komunikacji miejskiej jest SORT (Standardised On-Road Tests Cycles) opracowany przez UITP (International Association of Public Transport) [113]. Eksploatacyjne zużycie paliwa mieści się w zakresie 40–50 dm³/h i głównie zależy od prędkości średniej, która w tym teście wynosi od 12 do 25 km/h [41].

W raporcie z działalności Miejskiego Zakładu Autobusowego w Warszawie z roku 2015 podano, że średnie zużycie paliwa w autobusie przegubowym wynosiło około $45 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$. Biorąc pod uwagę wartość opałową oleju napędowego, autobus zużywał około 4,5 kWh energii chemicznej na przejechanie 1 km. Około 74% autobusów z silnikami spalinowymi (354 sztuki) MZA spełniało normę Euro 4, umożliwiając niskie zużycie paliwa w ruchu miejskim. Dla porównania zużycie energii elektrycznej, mierzone na wejściu do ładowarek, pokazywało, że autobusy elektryczne w taborze zużywają około 1 kWh na 1 km. Autorzy raportu [67] przedstawili wyniki badań zużycia paliwa przez autobusy spełniające normę EEV (Enhanced Environmentally-friendly Vehicle) podczas dwóch cykli jezdnych: Braunschweig (2,65 przystanku/km) i Helsinki 3 (1,99 przystanku/km). Zużycie paliwa wyniosło odpowiednio $44 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$ oraz $36 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$.

Autobus miejski o długości 12 m, z silnikiem o zapłonie samoczynnym, spełniający normę Euro VI, podczas przejazdu po trasie miejskiej w Poznaniu z przystankami (średnia prędkość 47 km/h na trasie 42 km) zużył $35 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$, z kolei autobus dwuczłonowy o długości 18 metrów (średnia prędkość 50 km/h na trasie 52 km) zużył $42 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$ [92]. W Lublaniu w Słowenii podobnej wielkości testowany autobus miejski spełniający normę EURO3 zużył około $48 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$ [158].

Testy obejmujące 75 autobusów Euro IV, jeżdżących w różnych warunkach miejskich w Pekinie, pozwoliły zmierzyć rzeczywiste zużycie paliwa i prędkość. Ich średnia wartość w godzinach wieczornego szczytu była niższa o około 20% niż średnie prędkości dla całodziennych tras objętych badaniem przez 6 dni tygodnia. Niższe średnie prędkości w godzinach wieczornego szczytu skutkowały wyższym zużyciem paliwa. Szacowane średnie całodziennie zużycie paliwa wynosiło $39,4 \pm 2,2 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$, podczas gdy w godzinach wieczornego szczytu było to $44,7 \pm 2,2 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$, co oznacza wzrost o 13% [237]. Rzeczywiste wartości są bliskie wyznaczonym przez autorów pracy, którzy ocenili, w oparciu o zebrane dane dotyczące rzeczywistego zużycia paliwa, że średnio autobusy miejskie zużywają $40 \text{ dm}^3/h$ [111]. Z kolei autorzy pracy, na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energii, oszacowali, że zużycie paliwa w autobusie miejskim, przejeżdżającym średnio rocznie 80 tys. km, wynosi $38 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$ [106].



Ryc. 3.6. Zmiany parametrów pracy silnika wysokoprężnego autobusu w trybie dziennym: prędkość obrotowa silnika (a), zużycie paliwa (b), położenie pedału przyspieszenia APP (c) [226]

Tak jak wspomniano na początku, styl jazdy danego kierowcy również ma wpływ na zużycie paliwa w autobusie miejskim. Na rycinie 3.6 przedstawiono parametry silnika wysokoprężnego autobusu miejskiego (położenie pedału przyspieszenia APP, zużycie paliwa na godzinę oraz prędkość obrotową silnika) zarejestrowane podczas pracy autobusu w typowym dniu podczas przejazdu przez miasto. Na wykresach APP zaznaczono 8-godzinny dzień pracy kierowcy. APP, jak widać na rycinie 3.6c, w pierwszej połowie doby eksploatacyjnej, która

wynosi około 8 godzin, waha się od 0% do 100%. Natomiast w godzinach od 14:00 do 22:00 średnia wartość górnego zakresu APP wynosi 75%. Godzinowe zużycie paliwa (ryc. 3.6b) zmienia się proporcjonalnie do APP. Średnie zużycie paliwa w przypadku pierwszego kierowcy wynosi $11,09 \text{ dm}^3/\text{h}$, a drugiego $9,92 \text{ dm}^3/\text{h}$. Zróżnicowanie stylów jazdy spowodowało większe zużycie paliwa o 11,7%. Prędkość obrotowa silnika wysokoprężnego waha się w granicach 500–1700 obr./min w trasie dziennej. Po osiągnięciu przez autobus miejski końca trasy silnik ZS został wyłączony, co obrazuje pusta przestrzeń na rycinie 3.6a. W przedstawionym badaniu całkowity czas trwania biegu jałowego w ciągu jednego dnia jazdy wynosi 41% [226].

3.2. Zużycie energii elektrycznej przez pojazd transportowy

Zużycie energii elektrycznej przez pojazd transportowy jest złożonym zagadnieniem, które wpływa na ogólną sprawność pojazdu. Z jednej strony układy napędowe stają się coraz bardziej wydajne w zamianie energii chemicznej paliwa na energię mechaniczną. Z drugiej strony wzrasta zużycie energii elektrycznej na potrzeby dodatkowych układów, co może skutkować zmniejszeniem ogólnej sprawności pojazdu i zwiększonym zużyciem paliwa. Według badań przeprowadzonych przez Europejskie Stowarzyszenie Producentów Samochodów (ACEA) autobus miejski zużywa około 26% paliwa na zasilanie dodatkowych układów napędowych. W skład tego zużycia wchodzi m.in. 7% na wentylator chłodzący, 6% na alternatory, 6,5% na sprężarkę powietrza, 2,4% na pompę wspomagania oraz 4% na sprężarkę klimatyzacji. Dodatkowo system generowania energii elektrycznej odpowiada za kolejne 5% zużycia paliwa [202]. Jest to spowodowane między innymi ciągle rosnącą liczbą odbiorników elektrycznych zamontowanych w pojazdach. W autobusach miejskich podstawowymi odbiornikami energii elektrycznej są elektroniczne układy wykonawcze w kabinie, układzie napędowym (pompy, podgrzewacze paliwa), pneumatycznym oraz układy sterowania (ECU, ABS, tachograf, skrzynia biegów).

Dyskusja na temat zużycia energii elektrycznej w pojazdach transportowych obejmuje również różnorodne elementy oświetlenia i zwiększania komfortu, takie jak wyświetlacze, oświetlenie kabiny, radio i odbiornik GPS. W przypadku gdy dostępna jest moc elektryczna przekraczająca 30 kW, można zastosować napęd elektryczny do wentylatora chłodzącego silnik. Taka konfiguracja pozwala przenieść chłodnicę z boku silnika, co z kolei umożliwia wykorzystanie większej przestrzeni pasażerskiej w autobusie miejskim. Wprowadzenie

silnika elektrycznego do napędu wentylatora chłodzącego stanowi element strategii optymalizacji wydajności energetycznej. W praktyce oznacza to, że wszystkie agregaty napędzane elektrycznie są uruchamiane tylko wtedy, gdy są potrzebne, a nie obciążają one silnika spalinowego na stałe w przypadku połączenia mechanicznego, takiego jak napęd pasowy lub przekładnia. Taka konfiguracja eliminuje stałe straty energii związane z pracą agregatów, które obecnie stanowią średnio od 4% do 10% wszystkich strat energii w układzie napędowym pojazdu [198].

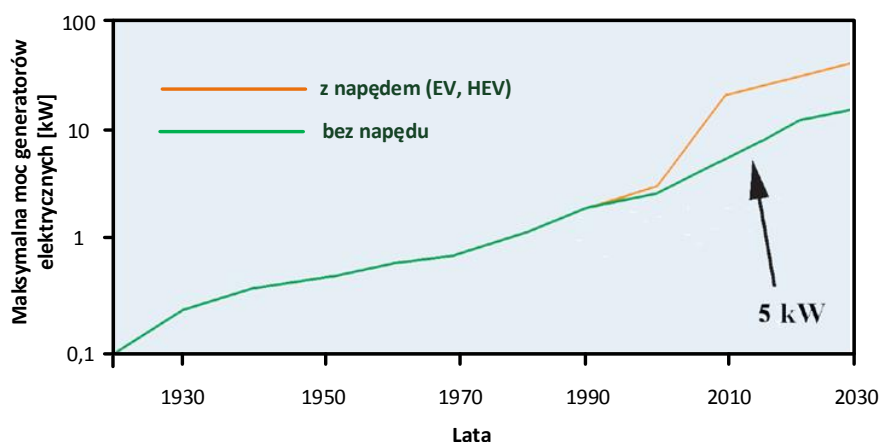
Na pokładzie autobusu montuje się coraz więcej dodatkowych odbiorników elektrycznych, które mają spełnić wymagania dotyczące komfortu podróży pasażerów. Są to układy elektryczne do przekazywania informacji audiowizualnej (monitory, wyświetlacze trasy), podgrzewane kasy biletowe i biletomaty, system monitoringu, oświetlenie wewnętrzne, system nawigacji, a także urządzenia niezbędne do prawidłowego funkcjonowania silnika i samego pojazdu. Istotnym odbiornikiem energii elektrycznej w autobusie miejskim jest system automatycznej klimatyzacji z układem nawiewowym, wykorzystujący elektryczne wentylatory. Najbardziej (chwilowo) obciążającym instalację elektryczną pojazdu jest rozrusznik. Pomimo zastosowania oszczędzających energię odbiorników elektrycznych, na przykład wykorzystujących technologię diodową, całkowita moc odbiorników elektrycznych na pokładzie autobusu może sięgać nawet 1,9–2,2 kW [140], [106].

Całkowita moc odbiorników elektrycznych na pokładzie pojazdu transportowego może wynosić nawet 5,6 kW, co oznacza, że maksymalne natężenie prądu w instalacji elektrycznej oraz alternatorze może sięgać nawet 230 A [85], [166]. Średnia moc odbiorników elektrycznych zamontowanych na pokładzie długodystansowej ciężarówki z silnikiem spalinowym wynosi 2 kW [154].

Przeprowadzone pomiary w czasie eksploatacji pojazdu ciężarowego firmy California Trailer Sp. z o.o. z Białej Podlaskiej pokazują, że znamionowe obciążenie instalacji elektrycznej ciężarówki z naczepą wynosi 0,8 kW. Pojazd bez włączonej klimatyzacji w czasie jazdy eksploatacyjnej pobiera maksymalne natężenie prądu 80 A, z czego 50 A przekazywane jest na doładowanie akumulatorów. Podczas postoju, przy wyłączonych wszystkich odbiornikach, natężenie prądu w instalacji elektrycznej wynosi 8 A. W ciągu doby pojazd z naczepą potrzebuje około 8 kWh energii elektrycznej.

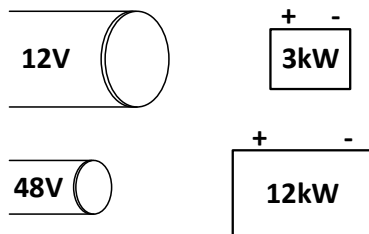
Na rycinie 3.7 ukazane są zmiany w czasie zapotrzebowania na moc elektryczną instalacji pojazdu transportowego z napędem spalinowym (zielona linia) oraz napędem hybrydowym (pomarańczowa linia). Na podstawie raportów Rady ds. Technologii i Utrzymania Ruchu TMC (Technology & Maintenance

Council) Amerykańskiego Stowarzyszenia Transportu Ciężarowego ATA (American Trucking Associations) zapotrzebowanie na moc elektryczną przeciętnego samochodu ciężarowego klasy 8 przez ostatnie 100 lat stale rośnie [208]. Obecne zapotrzebowanie na energię elektryczną w typowych samochodach ciężarowych i autobusach wynosi około 3–5 kW, jednak przewiduje się, że do 2030 roku wzrośnie do 40 kW w związku z rozwijającymi się hybrydowymi układami napędowymi.



Ryc. 3.7. Zmiany w czasie zapotrzebowania na moc elektryczną instalacji elektrycznej pojazdu transportowego z napędem spalinowym (linia zielona) oraz hybrydowym (linia pomarańczowa). Na podstawie [208]

Duże zapotrzebowanie na moc elektryczną na pokładzie pojazdów transportowych wymusiło konieczność zmiany napięcia z 6 V na 12 V ponad 40 lat temu. Obecnie samochody osobowe wyposażone są w instalacje 12 V, natomiast ciężarówki i autobusy korzystają z systemu 24 V. W dzisiejszych czasach, wraz z rozwojem pojazdów wyposażonych w układy napędowe z tzw. miękką hybrydą (ang. *mild hybrid*), wprowadza się instalacje o napięciu 48 V. Taki system wymaga mniej więcej czterokrotnie mniejszego natężenia prądu niż tradycyjny system 12 V, co prowadzi do zmniejszenia przekroju przewodów w instalacji elektrycznej oraz masy całej instalacji, jak to zostało przedstawione na rycinie 3.8.



Ryc. 3.8. Zależność grubości przewodów od przenoszonej mocy elektrycznej w układach o napięciu 12 V i 48 V

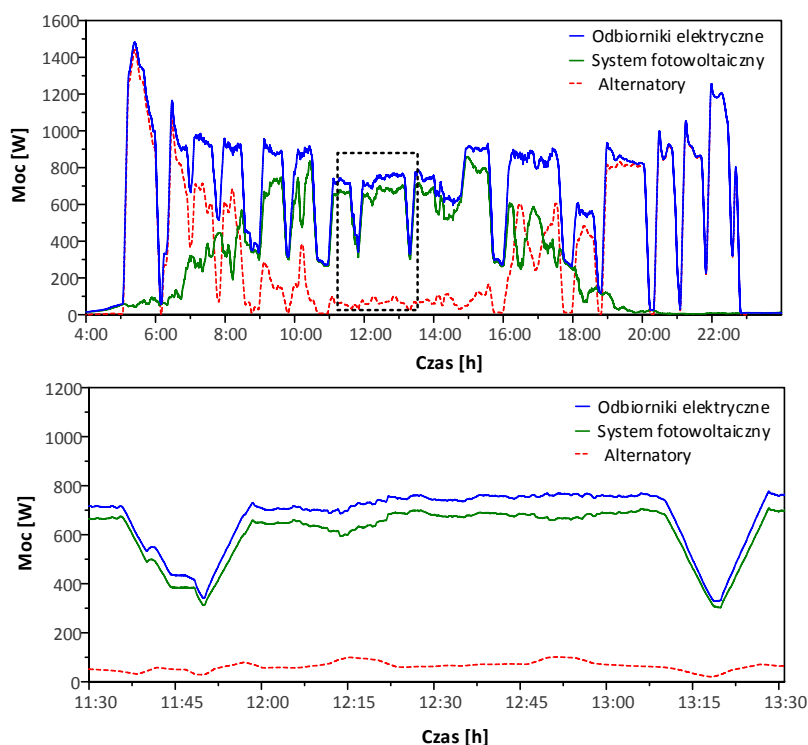
W tabeli 3.1 zestawiono maksymalną moc odbiorników na pokładzie miejskiego autobusu przegubowego Mercedes Conecto G, który był jednym z obiektów badawczych.

Tab. 3.1. Moc odbiorników elektrycznych na pokładzie autobusu (badania własne)

	Moc maksymalna [W]
Tablice informacyjne, oświetlenie, kasowniki, zasilacze	560
Oświetlenie wewnętrzne	84
Światła pozycyjne i oświetlenie zewnętrzne	252
Światła mijania	252
Wentylatory	252
Klimatyzacja kierowcy	532
Rozruch silnika	8500
Suma	1932

Na rycinie 3.9 przedstawiono moc poszczególnych części systemu generowania energii elektrycznej autobusu przegubowego, składającego się z alternatorów napędzanych silnikiem spalinowym oraz paneli fotowoltaicznych przetwarzających energię słoneczną na energię elektryczną. Całkowitą moc (oznaczoną kolorem niebieskim) niezbędną do zasilenia odbiorników elektrycznych na pokładzie autobusu zarejestrowano w ciągu przykładowego dnia. Odbiorniki elektryczne są zasilane zarówno z alternatorów (linia przerywana czerwona), jak i z systemu fotowoltaicznego (linia zielona). Energia elektryczna produkowana i zużywana na pokładzie autobusu nie jest uzależniona od stylu jazdy kierowcy. Energia elektryczna jest gromadzona w niedoładowanych akumulatorach tuż po rozruchu zimnego silnika. Maksymalna zarejestrowana moc elektryczna wynosi około 1,5 kW bezpośrednio po rozruchu zimnego

silnika. Rozrusznik pobiera energię elektryczną zgromadzoną w akumulatorach. Układ generowania energii, głównie składający się z alternatorów, uzupełnia zużytą energię, doładowując akumulatory i jednocześnie zasila odbiorniki na pokładzie autobusu. Średnie zapotrzebowanie na moc elektryczną w czasie pojedynczego przejazdu, przedstawione w dolnej części rycinie 3.9, wynosi 700 W. Jednocześnie w okresie intensywnego nasłonecznienia, zarejestrowanego w zaznaczonym okresie, udział energii elektrycznej generowanej z paneli fotowoltaicznych stanowi ponad 89% całkowitego zapotrzebowania. Pozostała część jest generowana z energii chemicznej paliwa poprzez silnik spalinowy oraz alternator.



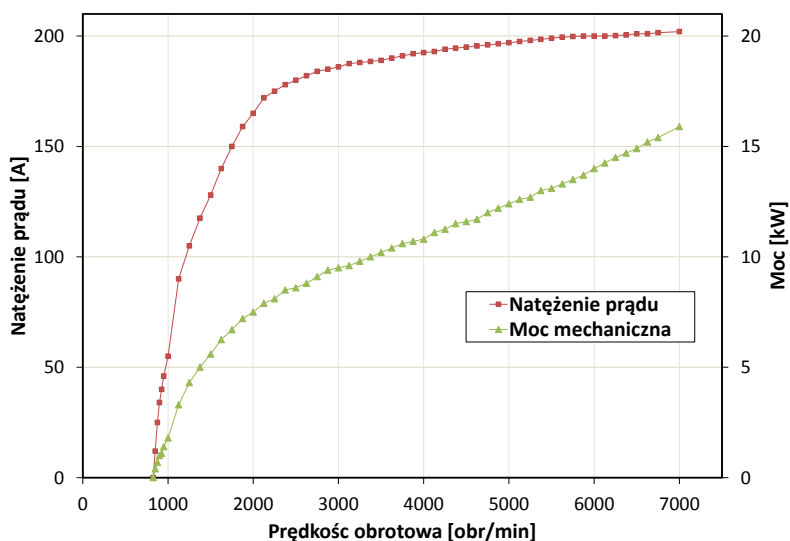
Ryc. 3.9. Moc poszczególnych części systemu energii elektrycznej autobusu przegubowego (18 m) zarejestrowana w ciągu dnia. Kolor niebieski – moc całkowita odbiorników elektrycznych, kolor zielony – moc systemu fotowoltaicznego, kolor czerwony – moc alternatorów [226]

3.3. Sprawność generowania energii elektrycznej w pojeździe

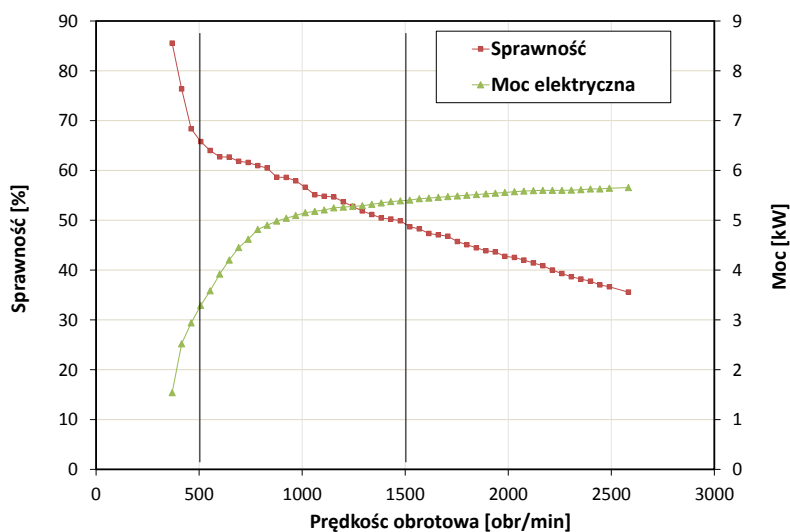
3.3.1. Alternator

Energia elektryczna w pojeździe z silnikiem spalinowym jest dostarczana przez alternator napędzany mechanicznie z silnika spalinowego, a także przez akumulator. Często zdarza się, że liczba dodatkowych urządzeń prowadzi do niedoboru zasilania dla urządzeń elektrycznych w pojeździe. Aby zrównoważyć zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną, stosuje się dwa lub nawet trzy alternatory. Warto jednak zauważyć, że pojedynczy alternator osiąga swoją maksymalną sprawność oraz moc przy dużej prędkości obrotowej wirnika powyżej 4000 obr./min. Przykładowa charakterystyka zewnętrzna autobusowego alternatora, prezentowana na rycinie 3.10, uwzględnia maksymalne natężenie prądu wynoszące 180 A w tzw. zimnych warunkach. Producent uzyskał tę charakterystykę przy temperaturze 25°C i stałym napięciu w instalacji testowej równym 28 V. Natężenie prądu, przedstawione na lewej osi, zależy od prędkości obrotowej wału alternatora, podczas gdy na prawej osi przedstawiona jest moc mechaniczna dostarczana do wału alternatora połączonego z wirnikiem chłodzącym. Maksymalne natężenie prądu alternatora (oznaczone jako I) na charakterystyce przekracza wartość nominalną 180 A, osiągając 200 A, co jest wynikiem zimnych uzwojeń alternatora. Moc nominalna uzyskiwana jest w ustabilizowanych warunkach, gdzie alternator utrzymuje stałą temperaturę i generowaną moc elektryczną (nagrzane uzwojenia), a jego chłodzenie odbywa się powietrzem o temperaturze 25°C.

Na podstawie powyższej charakterystyki udało się określić maksymalną sprawność alternatora, która jest definiowana jako stosunek uzyskanej mocy elektrycznej (wynikającej z iloczynu napięcia i natężenia prądu) do dostarczonej mocy mechanicznej. Na przedstawionym rycinie 3.11 zaprezentowano maksymalną sprawność alternatora w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego silnika, który jest połączony z alternatorem za pomocą przekładni o przełożeniu 2,71. Ponadto pionowymi liniami zaznaczono zakres prędkości obrotowych wału korbowego autobusowego silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym. Zarówno moc elektryczna, jak i sprawność w warunkach rzeczywistych ulegają obniżeniu ze względu na wzrost temperatury uzwojeń alternatora spowodowany jego obciążeniem elektrycznym oraz niekorzystnymi warunkami pracy w komorze silnika, gdzie temperatura osiąga średnio 90°C [75].



Ryc. 3.10. Charakterystyka zewnętrzna alternatora autobusowego Bosch 120 689 003 typ T1-28V 110/180 A o mocy nominalnej 180 A uzyskana przy stałym napięciu 28 V i 25°C. Linia czerwona – natężenie prądu na zaciskach alternatora w funkcji prędkości obrotowej jego wirnika. Linia zielona – wymagana moc mechaniczna (na podstawie Bosch)



Ryc. 3.11. Charakterystyka zewnętrzna alternatora autobusowego Bosch 120 689 003 typ T1-28V 110/180 A o mocy nominalnej 180 A uzyskana przy stałym napięciu 28 V, temperaturze 25°C połączonego mechanicznie z wałem silnika spalinowego z przełożeniem 2,71. Linia czerwona – sprawność maksymalna alternatora w funkcji prędkości obrotowej wału autobusowego silnika spalinowego. Linia zielona – generowana maksymalna moc elektryczna (badania własne)

Maksymalna moc alternatorów w warunkach miejskich osiągnięta jest tylko przez bardzo krótki okres. W przypadku pełnego obciążenia elektrycznego pojazdu o silniku pracującym na biegu jałowym (560 obr./min) bilans mocy jest ujemny, a udział biegu jałowego w trakcie eksploatacji wynosi 30% [74]. W jednym z analizowanych autobusów miejskich udział biegu jałowego (500 obr./min) wyniósł 41%. Silnik spalinowy autobusu miejskiego pracuje w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego od 500 do 1500 obr./min.

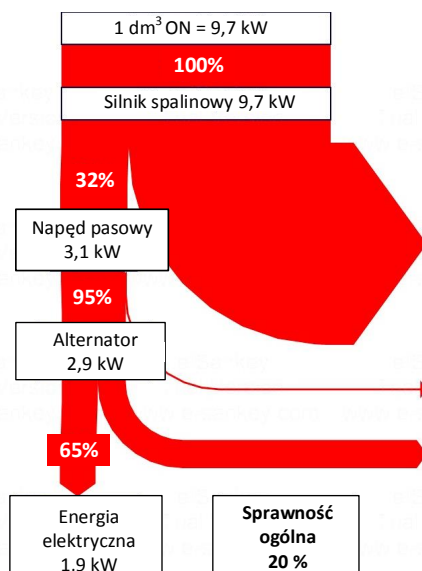
W przypadku analizowanego autobusu alternator o natężeniu prądu 140 A osiąga maksymalną moc 4 kW, a alternator 100 A – 2,8 kW przy prędkości wirnika 6000 obr./min. Jednocześnie 40% czasu pracy silnika to bieg jałowy o prędkości 500 obr./min, co przekłada się na prędkość wirnika alternatora wynoszącą 1350 obr./min dla alternatora 140 A i 2000 obr./min dla alternatora 100 A. Łączna moc generowana mechanicznie wynosi odpowiednio 2 kW i 1,4 kW. Sumarycznie układ złożony z jednego dużego alternatora 140 A i dwóch mniejszych 100 A ma zdolność generowania maksymalnej mocy elektrycznej wynoszącej 4,8 kW [226].

Moc odbiorników elektrycznych, zwłaszcza tuż po rozruchu, przekracza tę wartość, co prowadzi do szybkiego rozładowania akumulatora nawet podczas krótkiego postoju pojazdu bez włączonego silnika. Ponadto prowadzi to do pogorszenia stanu technicznego akumulatora oraz zwiększa koszty obsługi związane z wymianą akumulatorów.

3.3.2. Łańcuch strat w układzie generowania energii elektrycznej

Poddając analizie zapotrzebowanie na energię elektryczną urządzeń zamontowanych w pojeździe z silnikiem spalinowym o zapłonie samoczynnym, warto zaznaczyć, że głównym źródłem tej energii jest olej napędowy. Opałowa wartość oleju napędowego to 43 MJ/kg, a przy jego gęstości wynoszącej 0,82 kg/dm³ każdy dm³ oleju napędowego zawiera 9,7 kWh energii chemicznej. Energię chemiczną z paliwa przetwarza silnik na moc mechaniczną, a ta z kolei jest przekształcana na moc elektryczną przez alternator.

W pojeździe transportowym z silnikiem spalinowym głównym źródłem energii elektrycznej jest alternator, generujący ją w zależności od aktualnego zapotrzebowania użytkownika. Pracujący alternator nie tylko uzupełnia energię w akumulatorze, utraconą podczas rozruchu silnika spalinowego, ale także zasila bieżące odbiorniki elektryczne. Rycina 3.12 przedstawia łańcuch generowania energii elektrycznej z energii chemicznej paliwa na pokładzie pojazdu z silnikiem spalinowym.



Ryc. 3.12. Wykres Sankeya łańcucha generowania energii elektrycznej z energii chemicznej paliwa na pokładzie pojazdu z silnikiem spalinowym

Sprawność przekazywania energii chemicznej paliwa na energię mechaniczną wynosi maksymalnie 25–30% [9], co jest charakterystyczne dla samochodów osobowych. Silniki o zapłonie samoczynnym (ZS) montowane w ciężarówkach i autobusach osiągają maksymalną sprawność na poziomie 45%, a na biegu jałowym około 19%, co średnio daje wartość 32% [84]. Przekładnia pasowa przekazująca napęd z wału korbowego do alternatora ma sprawność około 95–98%, choć może być ona mniejsza w przypadku niewłaściwego napięcia paska klinowego [87]. Energia mechaniczna jest zamieniana na energię elektryczną za pośrednictwem alternatora ze sprawnością 50–65% [30], [181]. Przedstawia to również rycina 3.16, na którym w zakresie użytkowych prędkości obrotowych silnika sprawność alternatora jest w przedstawionym zakresie.

Podczas pracy silnika akumulator pełni funkcję stabilizatora, minimalizując straty ładowania/rozładowywania. Sumaryczna sprawność przekazywania energii chemicznej paliwa na energię elektryczną na pokładzie pojazdu wynosi 20%, a w skrajnych warunkach pracy, określonych przez minimalną sprawność silnika oraz minimalną sprawność alternatora, 14% [209]. Iloczyn sprawności poszczególnych elementów tego łańcucha nie przekracza w optymalnych warunkach 40% [96]. Objętość jednego dm^3 oleju napędowego zawiera 9,7 kWh energii chemicznej, co oznacza, że przy 20% sprawności ogólnej wytwarzania

energii elektrycznej (jak przedstawiono na rycinie 3.12) silnik spalinowy zużywa 0,526 dm³ oleju napędowego, aby wytworzyć 1 kWh energii elektrycznej na pokładzie pojazdu.

3.3.3. Współczynnik G_{kWh}

Objętość paliwa zużywanego do wytworzenia energii elektrycznej na pokładzie pojazdu z silnikiem spalinowym można zdefiniować za pomocą współczynnika G_{kWh} . Jest to stosunek objętości paliwa (wyrażonej w dm³) oraz wytworzonej energii elektrycznej E_{el} na pokładzie pojazdu (wyrażonej w kWh). Wzór pozwala określić, ile objętości paliwa jest zużywane do wytworzenia jednostki energii elektrycznej na pokładzie pojazdu z silnikiem spalinowym. Można to zapisać następującą zależnością:

$$G_{kWh} = \frac{G_c}{E_{el}} \quad (3.1)$$

gdzie:

G_{kWh} – objętość paliwa przeznaczona do wytworzenia 1 kWh E_{el} [dm³/kWh],

G_c – zużycie paliwa [dm³],

E_{el} – wygenerowana energia elektryczna na pokładzie pojazdu [kWh].

Ilość paliwa potrzebną do wytworzenia jednostki energii elektrycznej określono na podstawie rzeczywistych badań eksploatacyjnych silnika spalinowego połączanego z zespołem alternatorów. Dodatkowo autobus został wyposażony w system fotowoltaiczny. Autorzy pracy [57] podają, że badany przez nich system fotowoltaiczny rocznie może wygenerować 1,4 MWh, co odpowiada 750 dm³ oleju napędowego ($G_{kWh} = 0,53$ dm³/kWh). Badania 12-metrowego autobusu miejskiego na hamowni podwoziowej w stabilnych warunkach pracy (prędkość obrotowa 1 165 obr./min oraz moc na kołach o wartości 14 kW) przy zmianach mocy odbiorników elektrycznych w zakresie 0,4–2,8 kW dowiodły, że do wytworzenia 1 kWh autobus zużywa minimalnie 0,38 dm³ oleju napędowego ($G_{kWh} = 0,38$ dm³/kWh) [97].

Istnieje prawie liniowa zależność pomiędzy mocą silnika a zużyciem paliwa, z wyjątkiem bardzo małego obciążenia silnika. W opracowanym przez Komisję Europejską oprogramowaniu VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool), modelującym zużycie energii i paliwa całego pojazdu, związek

ten nazywany jest „linią zużycia paliwa” (FC-line) i został opracowany z koncepcji „linii Willansa” [228], [161], [214]. Zależność pomiędzy energią paliwa i mocą silnika określa w programie współczynnik Willansa ΔFC_w , który podaje masę paliwa potrzebną do wygenerowania kWh energii mechanicznej. Autor pracy [120] modelował autobus miejski z silnikiem spełniającym normę Euro VI, w którym wartość ΔFC_w wyniosła 0,189 kg/kWh. Średnia sprawność alternatora na podstawie oprogramowania wynosi 70%, co oznacza, że do wygenerowania 1 kWh energii elektrycznej w wysokosprawnym autobusie miejskim potrzeba minimum 0,33 dm³ oleju napędowego.

Autorzy pracy [157] przeprowadzili test miejski UDDS (Urban Dynamometer Driving Shedule) samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym ZI, podczas którego zwiększając obciążenie elektryczne alternatora, mierzyli jednocześnie zużycie paliwa. Analiza wyników badań dowodzi, że współczynnik $G_{kWh} = 1,1$ dm³/kWh. Należy pamiętać, że badany alternator był napędzany samochodowym silnikiem ZI o sprawności niespełna 17% (w teście pojazd potrzebował na pokonanie oporów ruchu 0,15 kWh i zużył objętość 0,1 dm³ benzyny – 0,9 kWh). Gdyby ten sam alternator napędzany był dużym autobusowym silnikiem o zapłonie samoczynnym o dużej sprawności i przejeżdżał ten sam test drogowy, jego sprawność zamiany energii chemicznej na mechaniczną byłaby na poziomie 25%. Wówczas współczynnik G_{kWh} wyniosłby 0,44 dm³/kWh.

W dużych generatorach elektrycznych, połączonych ze stacjonarnymi silnikami spalinowymi o zapłonie samoczynnym (ZS), współczynnik określający ilość paliwa potrzebną do wygenerowania 1 kWh energii elektrycznej wynosi $G_{kWh} = 0,44$ dm³/kWh [13]. Przykładem takich generatorów są systemy napędowe na statkach transportowych. Na podstawie badań autorów [234] godzinowe zużycie paliwa generatora elektrycznego połączanego z silnikiem wysokoprężnym przy elektrycznej mocy nominalnej o wartości 600 kW wynosi 149 kg/h. Oznacza to, że do wytworzenia 1 kWh statek zużywa 0,3 dm³ oleju napędowego. Należy podkreślić, że zespoły napędowe statków transportowych wyposażone są w wysokosprawne układy napędowe do generowania przede wszystkim energii elektrycznej. Stąd taka niska wartość ilości paliwa do wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej.

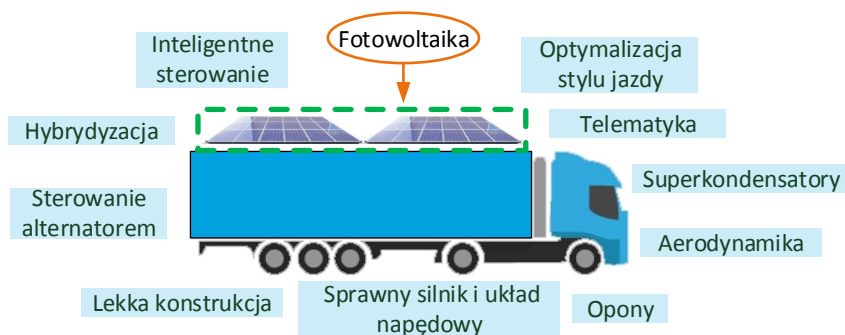
W tabeli 3.2 przedstawiono wartości współczynnika G_{kWh} [dm³/kWh] – objętość paliwa zużywana do wytworzenia energii elektrycznej za pośrednictwem silnika spalinowego. Podsumowując, zakres współczynnika G_{kWh} zawiera się w przedziale 0,3–1,1 dm³/kWh. Do obliczeń modelowych w pracy przyjęto wartość średnią $G_{kWh} = 0,5$ dm³/kWh.

Tab. 3.2. Wartości współczynnika G_{kWh} [dm^3/kWh] – objętość paliwa zużywana do wytworzenia energii elektrycznej za pośrednictwem silnika spalinowego

Obiekt	Silnik	Badania	źródło	G_{kWh} [dm^3/kWh]
–	ZS	analiza ryciny 3.12	–	0,526
Autobus	ZS	eksploatacyjne	[57]	0,53
Autobus	ZS	hamowniane	[97]	0,38
Autobus	ZS	modelowanie	[120]	0,33
Samochód osobowy	ZI	test NEDC	[157]	1,1
Samochód osobowy	ZS	analiza na podstawie [157]	[157]	0,44
Generator elektryczny	ZS	eksploatacyjne	[13]	0,44
Statek transportowy	ZS	eksploatacyjne	[234]	0,3
Średnia				0,505

3.4. Sposoby zmniejszania zużycia paliwa w środkach transportu

Właściciele flot pojazdów transportowych przejawiają zainteresowanie metodami mającymi na celu redukcję kosztów eksploatacji. Uwzględnia się wśród nich wydatki związane z paliwem, energią elektryczną pobieraną z sieci elektroenergetycznej oraz koszty związane z wymianą akumulatorów. Warto wyróżnić systemy oszczędzania, które można podzielić na czynne i bierne. Na rycinie 3.13 przedstawiono obszary technologii zmierzających do ograniczenia zużycia paliwa.



Ryc. 3.13. Obszary technologii oszczędzających paliwo w środkach transportu

Systemy czynne związane są z eksploatacją pojazdu oraz jego stanami jazdy, takimi jak przyspieszanie, hamowanie czy zjazd ze wzniesienia. Istotnym elementem bilansu energetycznego jest hamowanie silnikiem, podczas którego pojazd nie zużywa paliwa. W tym czasie pojazd traci zgromadzoną energię kinetyczną i potencjalną. Przykładowo autobus miejski wykorzystuje te stany przez 17% całkowitego czasu pracy [225]. Część tej energii jest konwertowana na energię elektryczną za pomocą alternatorów. Mercedes w autobusach z silnikiem spalinowym wykorzystuje pakiet superkondensatorów, który we współpracy z inteligentnym sterowaniem alternatorami umożliwia odzyskiwanie energii kinetycznej pojazdu.

Kluczowym źródłem dodatkowej energii w autobusach hybrydowych i elektrycznych jest odzyskiwana energia z hamowania. Sterowany odpowiednio silnik elektryczny działa jako generator, zamieniając energię kinetyczną na elektryczną. Ten system odzysku energii istotnie wpływa na bilans zużycia energii podczas eksploatacji pojazdu. Procentowy udział odzyskiwanej energii podczas hamowania w różnych cyklach jazdy (np. testy ECE w Europie, UDDS w USA i 10–15 w Japonii) wynosi odpowiednio 60,1%, 43,3% i 52,5% [83]. Systemy te zostały skomercjalizowane przez producentów samochodów, takich jak Toyota, Honda i Continental [236], a także dostosowane do autobusów miejskich.

Koncerny, takie jak BMW, Mazda i Nissan, wprowadziły systemy sterowania alternatorem, które pozwalają na obniżenie zużycia paliwa przez silnik spalinowy. W trakcie hamowania silnikiem alternator pracuje z maksymalną mocą, odzyskując część energii kinetycznej pojazdu. W stanach przyspieszania układ generowania energii elektrycznej jest chwilowo wyłączany. Podobne rozwiązania stosowane są w autobusach miejskich, gdzie można znaleźć nawet trzy alternatory.

W autobusach przeważają wysokosprawne jednostki napędowe z silnikami wysokoprężnymi, zasilane układem Common Rail, połączone z automatyczną hydrokinetyczną skrzynią biegów z retarderem. Proces przełączania biegów jest skoordynowany i zoptymalizowany przez elektroniczną jednostkę sterującą.

Jednocześnie intensywnie rozwijane są silniki spalinowe, a głównym celem jest poprawa ogólnej sprawności i redukcja emisji substancji toksycznych. Według raportu Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych [68] jednym z kluczowych kierunków rozwoju jest zastosowanie napędów hybrydowych, w których silnik spalinowy pracuje z optymalną sprawnością, uzależnioną od warunków eksploatacji w środowisku miejskim [195], [239]. Warunki te obejmują aspekty drogowe, dodatkowe obciążenia (takie jak klimatyzacja czy systemy informacyjne) oraz natężenie ruchu. Co istotne, ponad 40% czasu pracy

miejskiego autobusu to okres ruchu jałowego [205]. Sprawność ogólna silnika wysokoprężnego pracującego na biegu jałowym i w obciążeniu, na przykład zasilając alternator czy klimatyzację, może wynosić jedynie 3–11% [31]. Warto zaznaczyć, że podczas 10 sekund pracy silnika na biegu jałowym zużywa się więcej paliwa niż podczas ponownego uruchomienia [82].

Kolejnym środkiem redukcji zużycia paliwa jest optymalizacja stylu jazdy kierowcy, który może wpłynąć na zwiększenie zużycia paliwa o 5–10% lub jego zmniejszenie o 3–6% [12]. Moduł wspomagający technikę jazdy (asystent stylu jazdy) informuje kierowcę o gwałtownym przyspieszaniu lub przekraczaniu dopuszczalnej prędkości. System identyfikuje również kierowców za pomocą kodu PIN, umożliwiając szybką analizę techniki jazdy i jej wpływu na stan techniczny pojazdu oraz zużycie paliwa.

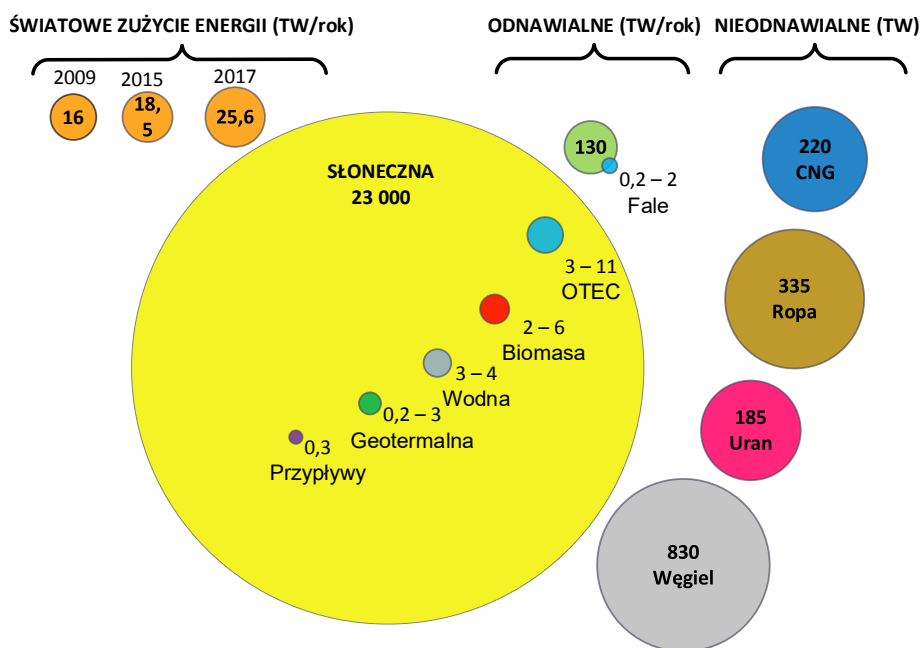
Funkcja Start-Stop, choć skuteczna w redukcji zużycia paliwa podczas pracy silnika w warunkach miejskich, nie jest stosowana w przypadku autobusów miejskich ze względu na duże obciążenie elektryczne wynikające z mocy zamontowanych odbiorników.

Zmniejszenie oporu aerodynamicznego pojazdu poprzez dodatkowe spoilery i boczne płaty może przyczynić się do obniżenia zużycia paliwa o 4,5% [223]. Zmiana maksymalnej prędkości z 89 do 82 km/h może skutkować obniżeniem zużycia paliwa o 6% w przypadku ciągnika siodłowego z przyczepą o mocy 331 kW. Chociaż maksymalna prędkość jest zmniejszona tylko o około 8%, to ze względu na kwadratową zależność oporu powietrza opór ten jest zredukowany o około 15% [144].

Systemy bierne, niezależne od ruchu pojazdu, stanowią dodatkowe źródło energii elektrycznej, bez względu na to, czy pojazd hamuje czy pracuje z maksymalnym obciążeniem. Coraz większą popularność zdobywają układy fotowoltaiczne (PV) w obszarach miejskich i zrównoważonej mobilności, zastosowane m.in. w systemach reklamowych, sygnalizacji świetlnej, latarniach ulicznych, parkometrach czy innych strukturach mających na celu ładowanie akumulatorów, zapewnienie funkcjonowania autonomicznego lub zasilanie sieci [168]. Moduły fotowoltaiczne dostarczają energii elektrycznej, zasilając odbiorniki na pokładzie pojazdu i uzupełniają energię w akumulatorach. To z kolei pozwala na redukcję zużycia paliwa oraz emisję substancji toksycznych [1], [190]. System fotowoltaiczny wydłuża żywotność akumulatora, zmniejszając tempo i stopień jego rozładowywania, a także pozwala na redukcję masy akumulatorów [22].

3.5. Słońce źródłem energii na Ziemi

Słońce składa się głównie z 80% wodoru, 20% helu i jedynie 0,1% innych pierwiastków. Jego intensywność promieniowania wynika z procesów syntezy jądrowej, podczas których Słońce traci aż 4,3 mln ton masy co sekundę, przekształcając ją w energię promieniowania. Każdy metr kwadratowy powierzchni Słońca emituje potężną moc wynoszącą 63,1 MW. To oznacza, że zaledwie jedna piąta kilometra kwadratowego powierzchni Słońca generuje ilość energii równą globalnemu zapotrzebowaniu na energię pierwotną na Ziemi. Na szczęście jedynie niewielka część tej energii dociera na powierzchnię naszej planety.



Ryc. 3.14. Fundamentalne spojrzenie na rezerwy energii na Ziemi. Na podstawie [115], [165]

Słońce umożliwia życie na Ziemi i bezpośrednio lub pośrednio jest źródłem energii dla większości systemów odnawialnych. Systemy fotowoltaiczne, kolektory słoneczne i elektrownie słoneczne przekształcają bezpośrednio promieniowanie słoneczne w użyteczną energię. Na rycinie 3.14 przedstawiono szacunkowe zasoby energii nieodnawialnej (ograniczonej) i odnawialnej Ziemi w 2015 roku, a także światowe zużycie energii w przykładowych latach w terawatach. Łączne rezerwy wydobywania zostały przedstawione dla nieodnawialnych zasobów, a dla zasobów odnawialnych uwzględniono potencjał roczny.

Na powierzchnię Ziemi napływa tak duża ilość energii słonecznej, że nawet roczne nasłonecznienie przewyższa łączne zasoby energetyczne ropy naftowej, węgla, gazu ziemnego i uranu. Energia pochodząca ze Słońca jest głównie energią odnawialną, gdyż wiatr, woda, biomasa i fale są bezpośrednimi rezultatami działania światła i ciepła słonecznego.

Słońce generuje rocznie aż 23 tys. terawatów energii, zakładając, że jedynie 35% światła słonecznego przenika przez atmosferę i dociera do mas lądowych. W porównaniu do tego wiatr dostarcza 75 do 130 terawatów energii rocznie [17], co stanowi niewielki odsetek całkowitej energii słonecznej. Warto zaznaczyć, że cała aktywność wiatru wynika z prądów konwekcyjnych generowanych przez Słońce, które ogrzewa atmosferę. Zgodnie z badaniami Stanforda 19% energii słonecznej z przestrzeni kosmicznej jest pochłaniane przez atmosferę, z czego 2,8% przypada na energię wiatrową. Jedynie niewielkie 0,1% energii słonecznej, która dociera na powierzchnię Ziemi, jest wykorzystywane w procesie fotosyntezy niezbędnej dla wszystkich żywych istot [156]. Konwersja tej przechwyconej energii w coś innego niż pożywienie jest wyjątkowo nieefektywna. Uprawa lub zbieranie biomasy, np. kukurydzy na etanol lub pelletów drzewnych do elektrowni, często nie jest neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla i zazwyczaj zużywa duże ilości wody, nawozów i paliwa do transportu.

Stowarzyszenie Energii Jądrowej szacuje [155], że na Ziemi znajduje się łącznie 15 milionów ton [156] zidentyfikowanych i potencjalnych zasobów uranu. Dodatkowo światowe Stowarzyszenie Energii Jądrowej prognozuje, że całkowite rezerwy uranu wystarczą na około 90 lat [231]. Pomimo tych danych nie jest zaskoczeniem, że rezerwy są mniejsze, niż przewidywano. Choć nowe technologie mogą potencjalnie zwiększyć efektywność wykorzystania uranu nawet 30–50 razy, to i tak pozostają one niewielkie w porównaniu do rocznej produkcji energii słonecznej.

4. Postawiona teza i zagadnienia badawcze

Zadanie udowodnienia postawionej tezy, że system fotowoltaiczny umieszczony płasko na dachu autobusu miejskiego jeżdżącego po ulicach Lublina (położonego na $22^{\circ}34'E$, $51^{\circ}15'N$, wschodnia Polska), produkuje mniej energii niż system fotowoltaiczny umieszczony płasko na otwartej, niezacienionej przestrzeni, stanowi wyzwanie ze względu na istnienie zarówno efektów negatywnych, jak i pozytywnych wpływających na produkcję energii elektrycznej na pokładzie autobusu (tabela 4.1). Szczegółowe analizy tych efektów znajdują się w poszczególnych rozdziałach.

Pierwszym istotnym czynnikiem jest lokalizacja geograficzna, a dokładniej położenie miasta Lublin. Uwzględniając kąt nachylenia geograficznego, można przewidzieć różnice w ilości światła słonecznego, które dociera do paneli fotowoltaicznych umieszczonych na dachu autobusu w porównaniu do tych na otwartej przestrzeni.

Dodatkowo mobilność autobusu może wpływać zarówno pozytywnie, jak i negatywnie na efektywność systemu. Autobus poruszający się po mieście może być narażony na cienie zbudowanych struktur, wpływając negatywnie na produkcję energii w porównaniu do stałego systemu na otwartej przestrzeni. Jednakże w miarę zmiany lokalizacji autobus może unikać pewnych obszarów zacienionych, co mogłoby zwiększyć efektywność systemu fotowoltaicznego.

Analiza wyników będzie wymagała uwzględnienia takich czynników jak kąt padania promieni słonecznych, zmiany pogodowe, a także sam fakt, że

autobus porusza się w różnych kierunkach, co może wpływać na optymalne wykorzystanie paneli fotowoltaicznych.

Podsumowując, udowodnienie tezy będzie wymagało kompleksowej analizy i uwzględnienia wielu zmiennych. Dokładne wyniki zostaną przedstawione w poszczególnych rozdziałach, uwzględniając zarówno pozytywne, jak i negatywne aspekty wpływające na produkcję energii elektrycznej w obu przypadkach.

Ogniwa fotowoltaiczne muszą być zamontowane horyzontalnie na dachu autobusu. Poszczególne panele są narażone na zmienne nasłonecznienie w trakcie ruchu pojazdu, gdzie dynamika zmian światła słonecznego jest znacznie wyższa niż w przypadku sztywnych modułów. Płaskie ustawienie oraz obszary słabo oświetlone, ze względu na wysokie budynki, drzewa i inne struktury, negatywnie wpływają na produktywność ogniw fotowoltaicznych w obszarach miejskich. Dodatkowo długotrwałe postoje pojazdu wymagają systemu, który chroni akumulator przed nadmiernym naładowaniem i umożliwia jego wyłączenie.

System fotowoltaiczny pojazdu ma korzystny współczynnik wydajności, ponieważ bezpośrednio zasila urządzenia elektryczne na pokładzie i dodatkowo chłodzi się podczas jazdy. Elastyczne panele fotowoltaiczne, zastosowane w konstrukcji, sprzyjają lepszemu chłodzeniu w porównaniu do szklanych paneli, ponieważ szyba ma większy opór cieplny niż folia EVA w panelach elastycznych. Ponadto budynki wzdłuż trasy autobusu dostarczają promieniowania rozproszonego i odbitego, stanowiąc dodatkowe źródło energii dla systemu fotowoltaicznego.

Tab. 4.1. Efekty wpływające na produkcję energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej na pokładzie autobusu

Efekt	
negatywny –	pozytywny +
pozycja horyzontalna	wykorzystanie promieniowania rozproszonego
zacienienia	wykorzystanie promieniowania odbitego
brak odbioru energii elektrycznej podczas długiego postoju	bezpośrednie zasilanie odbiorników elektrycznych
brak chłodzenia tylnej powierzchni paneli PV	chłodzenie przedniej powierzchni paneli PV podczas jazdy

Pierwsze zagadnienie badawcze dotyczyło analizy dostępnych rozwiązań paneli fotowoltaicznych do zastosowania w motoryzacji. Drugie skupiło się na

wyborze bazy danych lub metody pomiaru całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na poruszającym się pojeździe. Pierwszym krokiem było przeanalizowanie dostępności energii słonecznej dla płaskiego obiektu w różnych regionach Polski. Następnie porównano dwie bazy danych pomiarowych: trzydziestoletnią ze stacji meteorologicznych, opracowaną zgodnie z normą ISO, oraz dziesięcioletnią bazę z pomiarów satelitarnych PVGIS. Ostateczne dane zostały skonfrontowane z rocznymi badaniami eksperymentalnymi przeprowadzonymi na Politechnice Lubelskiej. Analiza pozwoliła na wybór efektywnego narzędzia do planowania i analizy zastosowań fotowoltaicznych systemów motoryzacyjnych w największych miastach Polski.

Trzecim zagadnieniem badawczym było określenie ilości energii słonecznej docierającej do czterech autobusów miejskich i porównanie jej z nieruchomym obiektem w kontekście czasowym: rok, pora roku, miesiąc, dzień i godzina. Czwarte zagadnienie badawcze miało na celu porównanie rocznej redukcji promieniowania słonecznego w przypadku autobusu miejskiego, biorąc pod uwagę maksymalne naświetlenie oraz maksymalny przebieg. Podmodele oparte były na szeregach czasowych danych pomiarowych z czterech autobusów miejskich. W ostatnim etapie przeprowadzono analizę wykorzystania energii słonecznej w systemie fotowoltaicznym zainstalowanym na autobusie miejskim.

5. Energia słoneczna w transporcie

5.1. Pojazdy elektryczne i hybrydowe

Dostępna literatura obejmuje szereg prac badawczych dotyczących generowania energii elektrycznej z modułów fotowoltaicznych oraz jej wykorzystania w motoryzacji [58], [150]. Przegląd motoryzacyjnych zastosowań energii słonecznej znajduje się w [180] i [14]. Większość badań skupia się na zastosowaniu modułów PV w pojazdach elektrycznych i hybrydowych. Systemy fotowoltaiczne znajdują zastosowanie nie tylko w grupie pojazdów elektrycznych i hybrydowych, ale również wśród pojazdów z silnikiem spalinowym. Przez kilkanaście lat zrealizowano kilkadziesiąt projektów badawczych, z których większość skupiła się na samochodach. Wyłoniły się prototypy oraz komercyjne oferty (takie jak Sion, Toyota, Nissan).

Większość badań koncentruje się na zastosowaniu modułów PV w pojazdach elektrycznych i hybrydowych. Pomimo niewielkiej powierzchni dachu pojazdu zużycie energii mechanicznej jest znaczne, co wynika z warunków jazdy. Energię elektryczną generowaną przez promieniowanie słoneczne na dachu pojazdu uznaje się jednak za niewystarczającą do pokonywania dużych dystansów [10]. Na przykład prototypowy samochód elektryczny Sion wyposażony w system fotowoltaiczny o mocy 1,2 kW osiągający sprawność 24%, umieszczony na karoserii, pozwala na pokonanie od 4 do 29 km w zależności od pory roku w klimacie północnoeuropejskim [221]. Z tego powodu energia

słoneczna często jest wykorzystywana jako dodatkowe źródło energii w prototypowych pojazdach elektrycznych lub tych przeznaczonych do startowania w zawodach sportowych, co znacznie zwiększa ich zasięg [8], [4], [62]. Autorzy pracy podkreślają, że moduły fotowoltaiczne najlepiej sprawdzają się do zasilania lekkich, aerodynamicznych pojazdów elektrycznych poruszających się z niską prędkością. Elektryczny zespół napędowy wspomagany energią słoneczną pozwala na zwiększenie zasięgu o 25–40 km [1], [2].

Systemy integracji pojazdów elektrycznych i hybrydowych z systemami fotowoltaicznymi można podzielić na dwie zasadnicze kategorie. Pierwszą z nich stanowią systemy pośrednio zasilające odbiorniki elektryczne pojazdu, do których zaliczają się stacjonarne stacje ładowania wyposażone w system fotowoltaiczny dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Takie rozwiązania pozwalają na ograniczenie ładowania pojazdu z sieci elektroenergetycznej i maksymalizację wykorzystania mocy generowanej przez moduły [64], [134], [101], [143], [118]. Warto zauważyć, że jest to jedyny sposób bezpośredniego wykorzystania energii pierwotnej i odnawialnej w samochodzie, eliminujący konieczność korzystania z nośnika energii, co przekłada się na uniknięcie strat, degradacji, emisji oraz kosztów związanych z transportem energii [180]. Jednakże, choć korzystanie z pojazdów elektrycznych przyczynia się do redukcji emisji CO₂, efekt ten jest uzależniony od miksu energetycznego i technologicznego stosowanego w produkcji energii elektrycznej w danym kraju [193]. W Polsce, gdzie udział węgla w produkcji energii elektrycznej jest znaczny, zmniejszenie emisji CO₂ przez samochód elektryczny wynosi zaledwie 25% [70]. Warto podkreślić, że ładowanie akumulatorów pozostaje kwestią krytyczną, potencjalnie negatywnie wpływającą na sieć elektryczną, co wymaga wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań, takich jak „inteligentne sieci” [95].

Energia słoneczna, jako odnawialna i darmowa, jest rozproszona w dużym stopniu. Łącząc ją z pojazdami, narodziła się koncepcja hybrydowych pojazdów słonecznych, które mogą przynieść znaczne korzyści w zakresie oszczędności paliwa i redukcji emisji, zwłaszcza w warunkach miejskiego ruchu o niewielkiej ciągłej prędkości [7], [19]. Dodatkowo, ze względu na malejące koszty i rosnącą wydajność technologii fotowoltaicznej, a także zwiększające się koszty paliw tradycyjnych, pojazdy hybrydowe i elektryczne z instalacją fotowoltaiczną mogą stać się nie tylko ekonomicznie opłacalne, ale także mogą pełnić rolę magazynu i generatora energii dla sieci elektroenergetycznej [42], [201]. Nowa koncepcja „pojazdów w sieci” (Vehicle to Grid – V2G) opiera się na pokryciu pojazdów elastycznymi powierzchniami z modułów fotowoltaicznych o minimalnej mocy 120 W. Wytworzona energia elektryczna jest wprowadzana

do sieci najpierw w formie prądu stałego, a następnie przekształcana w prąd zmienny za pomocą falowników. Szacowana moc farmy fotowoltaicznej stworzonej na 10 tys. parkujących pojazdach na otwartej przestrzeni wynosiłaby 1,2 MW. Zainstalowanie systemów PV o mocy 500 W na 200 milionach samochodów w USA dałoby łączną mobilną instalację o mocy 100 GW, co stanowiłoby 1/7 całkowitej mocy elektrycznej kraju [129].

Systemy fotowoltaiczne bezpośrednio zasilające odbiorniki elektryczne na pokładzie pojazdu stanowią drugą grupę integracji. W tym przypadku zastosowanie fotowoltaiki w samochodach elektrycznych i hybrydowych prowadzi do redukcji potrzeb dotyczących ładowania akumulatorów, a także rekompensuje samoistne rozładowanie. Ostatnio rosnące zainteresowanie skupia się na integracji hybrydowych pojazdów elektrycznych z fotowoltaicznymi źródłami energii [180], co potwierdzają wprowadzone niedawno moduły fotowoltaiczne przeznaczone do montażu w hybrydowych pojazdach przez jednego z największych producentów samochodów. Pojazdy hybrydowe napędzane energią słoneczną mogą przynieść znaczne korzyści w kwestii efektywności paliwowej i emisji zanieczyszczeń, zwłaszcza w warunkach nieregularnego użytkowania w ruchu miejskim [21], [20], [179]. Model pojazdu hybrydowego z zainstalowanym systemem PV, oparty na rzeczywistych cyklach jazdy, potwierdza redukcję zużycia paliwa i emisji CO₂ o 18–20% [137]. Jednakże udział energii netto z modułów fotowoltaicznych zamontowanych w standardowym pojeździe pozostaje ograniczony w porównaniu z zapotrzebowaniem na energię trakcyjną, ze względu na ograniczenia przestrzenne [180]. W celu zwiększenia udziału energii słonecznej zastosowanie systemów nadążnych może odgrywać kluczową rolę: obecnie systemy te zyskują popularność w instalacjach stacjonarnych, co przyczynia się do ich rozwoju [104].

Elektryczne układy napędowe ciężarówek i autobusów wymagają znacznych ilości zmagazynowanej energii w akumulatorach, co może być kosztowne [127]. Jednym z potencjalnych rozwiązań obniżających te koszty jest uzupełnienie układu napędowego modułami fotowoltaicznymi. System taki pozwala ponadto przedłużyć żywotność baterii o 10–19% [136]. Elastyczne moduły fotowoltaiczne umożliwiają integrację pojazdów bez strat aerodynamicznych i dużych kosztów związanych z ich konstrukcją. Skuteczność modułów fotowoltaicznych w poprawie efektywności pojazdu elektrycznego o dużej mocy zależy od ich mocy wyjściowej w stosunku do mocy pobieranej przez pojazd. Energia z systemu fotowoltaicznego ma znaczący wpływ głównie przy niskich prędkościach – straty mocy pojazdu związane z oporami toczenia i aerodynamicznymi rosną liniowo i sześciennie wraz z prędkością, podczas

gdy moc generowana z modułów pozostaje niezależna od prędkości. Mniejsza masa i mniejsza powierzchnia czołowa autobusu w porównaniu z ciężarówką redukują wpływ oporów toczenia i sił oporu. Autobusy często poruszają się z umiarkowaną prędkością i są używane w trybie biegu jałowego, co sprawia, że fotowoltaika może stanowić istotny udział w ogólnym zużyciu energii.

W pojazdach, nie tylko elektrycznych, system PV może także zasilac różne systemy pokładowe, takie jak radio, klimatyzacja [51], wentylacja [219] czy nawigacja, odciążając tym samym inne źródła energii. System wentylacji kabiny zasilany energią słoneczną pozwala na obniżenie temperatury wewnątrz pojazdu do poziomu zewnętrznej [176].

Autorzy pracy [91] analizowali zastosowanie systemów PV jako zewnętrznego generatora elektrycznego w pojazdach elektrycznych i hybrydowych. Energia z systemu fotowoltaicznego była gromadzona w dodatkowym akumulatorze. Autorzy oszacowali czas zwrotu systemu dla modelu Toyota Prius na poziomie 4 lat, co pozwoliłoby zaoszczędzić rocznie 100 dm³ paliwa. Zintegrowane systemy fotowoltaiczne jako dodatkowe źródło napędu dla hybrydowych pojazdów typu PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) mogłyby dostarczyć nawet do 25% energii potrzebnej do pokonania rocznego przebiegu na poziomie 24 tys. km [128]. Podobne testy przeprowadzone na hybrydowej toyocie przez autorów pracy [212] wykazały, że średnia dzienna generacja energii z systemu fotowoltaicznego wynosiła 2 kWh, co pozwalało na przejechanie 10 km na napędzie elektrycznym. Autorzy innej pracy [23] z 2015 roku twierdzili, że zastosowanie systemu fotowoltaicznego o sprawności 16% na samochodzie osobowym pozwalałoby na zwrot inwestycji w czasie krótszym niż 3,5 roku. W tekście zaznacza się także, że w przypadku poprawy sprawności o dodatkowe 2% oraz obniżki kosztów o 10% okres zwrotu inwestycji skróci się do mniej niż 2,5 roku.

W artykule [186] opisano zastosowanie systemu PV w napędzie samochodu osobowego, który wyposażony jest zarówno w silnik spalinowy, jak i dodatkowy silnik elektryczny z akumulatorem. Napęd elektryczny jest używany podczas przyspieszania i jazdy w warunkach miejskich. Dodatkowy stacjonarny system PV umożliwia ładowanie akumulatorów w czasie postoju. Należy jednak zauważyć, że przy zastosowaniu tego systemu występują pewne straty związane z procesem ładowania i rozładowywania akumulatorów. W pracy [178] głównym celem było przekształcenie konwencjonalnego pojazdu w samochód hybrydowy, który jest wspomagany przez system PV

(Mild-Solar-Hybrid). Autorzy skoncentrowali się na integracji komponentów, takich jak silniki w kołach, moduły PV i akumulatory, oraz opracowaniu optymalnego sterownika do zarządzania energią. W innym badaniu [45] przedstawiono analizę sterowania i korzyści związane z zastosowaniem ruchomego dachu słonecznego podczas parkowania w pojeździe zasilanym energią słoneczną. Procedura sterowania opierała się na łącznym wykorzystaniu danych dotyczących energii słonecznej z modułu fotowoltaicznego, informacji z modułu GPS i przetwarzania obrazów nieba z kamery internetowej. Zastosowanie ruchomego dachu słonecznego przyniosło względne korzyści z energii słonecznej na poziomie do 30%, szczególnie gdy samochód jest używany przez jedną lub dwie godziny dziennie w ruchu miejskim [6]. Energia słoneczna z ruchomych modułów jest gromadzona wyłącznie podczas fazy parkowania. Większość systemów stosuje moduły fotowoltaiczne ułożone płasko na pojeździe, aby uniknąć zwiększania oporów aerodynamicznych. Warto jednak zaznaczyć, że w przypadku poruszającego się pojazdu znaczna część energii wygenerowanej przez moduły mogłaby być pochłonięta przez układ poruszający modułami.

Na targach elektroniki użytkowej w Las Vegas w roku 2014 firma Ford zaprezentowała koncepcyjny model Ford C-Max Solar Energi, który był zintegrowany z instalacją fotowoltaiczną o mocy 1,5 kW. Ta innowacyjna instalacja pozwalała hybrydowej jednostce silnikowej przejechać w trybie elektrycznym 30 km po 4-godzinny postój [52].

5.2. Pojazdy z silnikiem spalinowym

Zarówno ośrodki naukowe, jak i przemysł motoryzacyjny dążą do rozszerzenia zastosowań systemów fotowoltaicznych w motoryzacji. Systemy PV mogą zasilać elektryczne systemy pokładowe pojazdu, takie jak radio, klimatyzacja czy nawigacja, co przyczynia się do odciążenia innych źródeł energii. Energia elektryczna generowana przez moduły PV zamontowane na dachu pojazdu może zastąpić lub uzupełnić energię produkowaną przez alternator, co prowadzi do redukcji zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń [190]. Ponadto systemy fotowoltaiczne stanowią źródło energii elektrycznej, nawet gdy pojazd jest zatrzymany. Przykładem tego rozwiązania jest elektrycznie otwierany dach Solar ze zintegrowanymi ogniwami słonecznymi [108]. W warunkach minimalnego nasłonecznienia przetwarza energię słoneczną na energię elektryczną, zasilając specjalną dmuchawę w układzie wentylacji. Ta innowacyjna wentylacja

nie obciąża akumulatora pojazdu, dostarczając świeże powietrze do wnętrza pojazdu, nawet gdy silnik jest wyłączony. Taka funkcjonalność pozwala obniżyć temperaturę w kabinie aż o 50%.

W niektórych przypadkach niewielkie systemy PV są montowane fabrycznie w samochodach, na przykład w takich jak Toyota Prius, Nissan Leaf czy VW Passat. Japońska firma Kyocera produkuje moduły cienkowarstwowe montowane na szyberdach hybrydowej Toyoty Prius. Obecnie Audi, Hyundai oraz Tesla pracują nad projektami solarnych dachów do samochodów produkowanych seryjnie.

W sektorze komunikacji publicznej: w autobusach czy ciężarówkach zainstalowane systemy fotowoltaiczne pozwalają zmniejszyć zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń w tych pojazdach [89], [224]. Ponadto generowany strumień energii elektrycznej może być wykorzystywany jako dodatkowe źródło energii do akumulatorów głębokiego rozładowania stosowanych podczas postoju pojazdu. Autorzy pracy [57] przedstawili wyniki badań autobusu z silnikiem spalinowym wyposażonego w system PV o mocy maksymalnej 600 W. System PV oparty na szklanych modułach jest w stanie przez rok zastąpić energię elektryczną produkowaną na pokładzie autobusu miejskiego równoważnością objętości 750 dm³ oleju napędowego.

W 2013 roku Politechnika Lubelska prowadziła projekt naukowo-badawczy o akronimie PVBUS, we współpracy z miejskim przedsiębiorstwem komunikacyjnym, w dziedzinie technologii autobusowych struktur fotowoltaicznych mających na celu zmniejszenie zużycia paliwa i emisji toksycznych składników spalin. Projekt ten był finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBIR). Pierwsza instalacja fotowoltaiczna została zamontowana na 12-metrowym autobusie miejskim z silnikiem ZS. Instalacja badawcza oparta na przeznaczonych do tego, elastycznych modułach fotowoltaicznych o mocy 1,8 kW, według wstępnych szacunków, zapewniała 26% zapotrzebowania na energię elektryczną autobusu. Szacuje się, że instalacja fotowoltaiczna zwróciła się w ciągu 3 lat użytkowania, umożliwiając oszczędności średnio 3% paliwa rocznie, zastępując energię uzyskiwaną z konwersji energii chemicznej paliwa na energię elektryczną w alternatorze [89].

W Norwegii firma transportowa Nettbuss zainstalowała w 2017 roku 10 instalacji fotowoltaicznych opartych na elastycznych modułach o łącznej mocy 14,4 kW na autobusach miejskich. Twierdzą, że są w stanie maksymalnie zmniejszyć zużycie paliwa o 5%. Inny autobus wyposażony w system PV został oddany do użytku w Tybecie w 2015 roku. Japońska firma Equips Public Bus oferuje model autobusu z systemem PV o mocy 0,8 kW. Przykłady

instalacji opartych na sztywnych modułach słonecznych wprowadza chińska firma China Nanchang Engineering, która zaoferowała dostawę 600 autobusów zasilanych energią słoneczną w 2019 roku. Kowloon Motor Bus Co. Ltd. (KMB) wprowadziła drugą generację dwupokładowego autobusu z systemem fotowoltaicznym. W 2019 roku firma przewozowa FlixBus wyposażyła autobus dwupokładowy kursujący na trasie Dortmund–Londyn w moduły fotowoltaiczne, co pozwoliło zmniejszyć zużycie paliwa. W artykule [54] opisano zastosowanie systemu fotowoltaicznego połączonego z akumulatorem do zasilania systemu klimatyzacji w czasie postoju autobusu miejskiego.

Firma Kiira Motors z Ugandy w 2016 roku przedstawiła model autobusu Kayoola wyposażonego w moduły fotowoltaiczne, które ładują jedną z dwóch baterii zainstalowanych na pojeździe [211].

Miejskie Zakłady Transportowe w Warszawie mają w swoim taborze ponad 300 autobusów z systemami fotowoltaicznymi o mocy co najmniej 1 kW każdy, co poprawia bilans energetyczny autobusów miejskich z silnikami spalinowymi.

Moduły fotowoltaiczne montowane na samochodach ciężarowych mogą przyczynić się do oszczędności paliwa i dostarczać energii do różnych odbiorników w kabinie, takich jak układ ogrzewania/chłodzenia, lodówka czy systemy rozrywki. Firma Fraunhofer wdrożyła rozwiązanie *vehicle to grid*, które pozwala ciężarówkom zasilać sieć elektryczną podczas postoju w bazie za pomocą energii z modułów fotowoltaicznych zamontowanych na pojazdach. Testy ciężarówek chłodni wykazały całkowitą oszczędność energii wynoszącą 1100 dm³ oleju napędowego rocznie. Oszczędności energii w czasie pracy poza siecią elektryczną odpowiadały objętości 166 dm³ oleju napędowego [63]. W 2010 roku firma Iveco zaprezentowała koncepcyjną ciężarówkę wyposażoną w moduły fotowoltaiczne od firmy Enecom, zdolne dostarczyć 2 kWh energii elektrycznej [117].

W 2011 roku rozpoczęto projekt SuperTruck, zlecony przez Departament Energii USA, mający na celu opracowanie samochodu ciężarowego, który poprawi wydajność transportu o 50%. W ramach tego projektu zastosowano moduły fotowoltaiczne. Pod koniec 2015 roku Daimler zaprezentował innowacyjną ciężarówkę Freightliner SuperTruck, która zużywa niemal o połowę mniej paliwa niż pojazdy o podobnej ładowności, głównie dzięki hybrydowym napędowi, aerodynamicznym kształtom, a przede wszystkim zamontowanym na dachu modułom fotowoltaicznym.

W ramach wspólnej inicjatywy Starship Initiative, Shell Lubricants i Air Flow Truck Company opracowano hiperwydajną półciężarówkę klasy 8,

znaną jako Starship. To pojazd następnej generacji o radykalnie niestandardowym kształcie aerodynamicznym, wyposażony w dużą ilość modułów słonecznych. Układ solarny o mocy 5 kW rozmieszczony jest na całym dachu przyczepy o długości 25 metrów i szerokości 2,6 metra. Moduły słoneczne służą do ładowania i magazynowania energii dla standardowych urządzeń elektrycznych.

Instytut Systemów Energii Słonecznej im. Fraunhofera ISE we współpracy z firmami transportowymi testuje 2 eksperymentalne pojazdy z modułami słonecznymi w Europie i USA. Badania te mają na celu oszacowanie potencjału energii słonecznej, a udowodniono, że wpływa ona istotnie na sposób i miejsce eksploatacji pojazdu.

Thermo King, firma dostarczająca usługi w zakresie kontroli temperatury w transporcie, wprowadziła moduły słoneczne ThermoLite o mocy 110 W do swojej oferty. Mają one na celu dostarczenie zrównoważonego rozwiązania do zarządzania energią dla jednostek chłodniczych, jednocześnie zmniejszając zużycie paliwa i emisję CO₂. Nawet przy słabym oświetleniu moduły słoneczne są w stanie w pełni naładować akumulator jednostki chłodzącej, eliminując konieczność użycia silnika do ładowania. Thermo King twierdzi, że to rozwiązanie może obniżyć zużycie paliwa o nawet 23% i emisję CO₂ o 560 kg w porównaniu do jednostek chłodniczych pracujących bez modułów fotowoltaicznych.

Autorzy prac [25], [26], [27] badali również wykorzystanie modułów fotowoltaicznych do wspomagania pracy naczep chłodni. Jedna z naczep poruszała się w okolicach Londynu, a energia elektryczna pozyskiwana była przez agregat chłodniczy z układem nawiewno-wywiewnym i sterowaniem. Zużycie energii elektrycznej było proporcjonalne do sumy natężenia promieniowania słonecznego. Instalacja składała się z istniejących na rynku monokrystalicznych modułów fotowoltaicznych o sprawności 12%, zajmujących 35 m² i generujących moc 4,4 kWp w ustalonych warunkach.

W innym artykule [224] przedstawiono koncepcję wykorzystania technologii fotowoltaicznej do wspomagania napędu agregatów chłodzących w chłodniach na naczepach. W ciągu roku naczepa z zainstalowanym systemem PV ma potencjał emitowania o 4,4 tony CO₂ mniej niż przy użyciu najlepszych dostępnych technologii. Okres zwrotu inwestycji szacowany jest na 3 lata.

Innowacyjny system fotowoltaiczny „i-Cool Solar” dostarcza energię elektryczną do systemu klimatyzacji kabiny podczas postoju ciężarówki. Opracowano go we współpracy z Mitsubishi Chemical Corporation (dostarczającego moduły PV), ICL Co. Ltd (odpowiedzialnego za systemy klimatyzacji) i Nippon Fruehauf C (producenta naczep). W trakcie jazdy cienkowarstwowe moduły PV o maksymalnej mocy 900 Wp ładowane są do dodatkowych akumulatorów.

Według źródła literaturowego [61] roczne oszczędności paliwa wynoszą 1% (1500 dm³).

Projekt FIVE, realizowany przez publiczny zakład opieki zdrowotnej w Andaluzji (Hiszpania), producenta modułów fotowoltaicznych i dostawcy wyposażenia medycznego, zakładał integrację systemu fotowoltaicznego z ambulansem medycznym. Alternator o mocy 100 A odpowiedzialny był za ładowanie dwóch akumulatorów. Dzienna produkcja energii z alternatora wynosiła 223 Ah, podczas gdy dzienne zapotrzebowanie oscylowało w granicach 310 Ah. Zainstalowano także instalację PV o mocy 400 Wp, składającą się z 8 modułów o łącznej powierzchni 3,5 m². Średnie dzienne generowanie energii z tej instalacji wynosiło nawet 90 Ah przy napięciu 12 V, co przekłada się na dzienną średnią moc 1080 W (308 W/m²). W tym samym okresie średnia dzienna suma całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię modułu fotowoltaicznego wynosiła 4,95 kWh/m² [10].

Należy jednak zaznaczyć, że komercyjne oraz prototypowe przykłady zastosowania modułów fotowoltaicznych na autobusach miejskich nie przedstawiają dostatecznych danych pomiarowych.

5.3. Potencjalne korzyści i wyzwania

W poprzednim rozdziale dokładnie omówiono przykłady zastosowania energii słonecznej w motoryzacji. Główne tego korzyści wynikają z redukcji zużycia paliwa, energii elektrycznej oraz zwiększenia zasięgu pojazdu elektrycznego, co prowadzi do obniżenia emisji CO₂. Porównanie montażu modułu nieruchomego z modułem poruszającym się wraz z pojazdem pozwala wyłonić podstawowe różnice i wyzwania.

Podczas eksploatacji pojazdu dach podlega drganiom i deformacjom, które przenoszą się na system fotowoltaiczny. Ogniwa słoneczne umieszczone w elastycznej obudowie są podatne na naprężenia mechaniczne, dlatego ich montaż powinien gwarantować ochronę przed nadmiernym obciążeniem modułu. Jednocześnie należy unikać przekroczenia masy modułów, aby nie obciążać konstrukcji dachu pojazdu lub naczepy oraz nie zwiększać zużycia paliwa. Dlatego zastosowanie elastycznych modułów fotowoltaicznych jest zalecane. Warunki pracy ograniczają możliwość wykorzystania tradycyjnych ramowych modułów dostępnych na rynku, powszechnie używanych w budynkach i farmach fotowoltaicznych.

Zainstalowany zestaw ogniw może wpływać na aerodynamikę pojazdu, zmieniając siły aerodynamiczne. Jednocześnie po przymocowaniu do metalowego dachu może ulegać silnemu rozgrzaniu, co z kolei wpływałoby na sprawność przetwarzania energii słonecznej. Konieczne są badania mające na celu ocenę stanu termicznego i aerodynamicznego elementów systemu.

Montaż modułów fotowoltaicznych wiąże się z dodatkowymi kosztami związanymi z niezawodnym uszczelnianiem fotowoltaicznych ogniw słonecznych w zakrzywionej części nadwozia pojazdu. W porównaniu do konwencjonalnych płaskich modułów fotowoltaicznych części te są produkowane w stosunkowo niewielkich ilościach – pod każdy model pojazdu. Wymagane są technologie zakrzywionych, elastycznych i lekkich modułów o niskich kosztach i wysokiej niezawodności.

Projektowanie zabudowy modułów fotowoltaicznych przeznaczonych dla autobusów, ciężarówek czy samochodów osobowych powinno uwzględniać kształt powierzchni dachu oraz znajdujących się na nim elementów. Na przykład w przypadku dachu autobusu Mercedes Conecto powierzchnia dachu nie jest płaska, ale oparta na promieniu równym około 20 m. Instalacja fotowoltaiczna powinna przylegać do dachu, a jej wysokość nie powinna przekraczać 1 cm, aby nie zwiększać oporu aerodynamicznego. Geometryczny układ ogniw fotowoltaicznych powinien być dostosowany do kształtu dachu pojazdu transportowego, aby maksymalnie wykorzystać dostępną powierzchnię [73].

Estetyka pojazdu również ma znaczenie, dlatego moduły muszą być nie tylko wydajne, ale także kolorowe. Dzięki odpowiednio zaprojektowanym powłokom optycznym można osiągnąć kolor bez znaczącej utraty wydajności.

Zamontowany zestaw ogniw powinien być sprawnie połączony z optymalnie umieszczoną jednostką sterującą oraz umożliwiać integrację z instalacją elektryczną pojazdu. W przypadku systemu fotowoltaicznego umieszczonego na przyczepie konieczne jest opracowanie skutecznego sposobu połączenia z podstawowym pojazdem.

Nadmiar wyprodukowanej energii elektrycznej, zwłaszcza w okresach intensywnego nasłonecznienia, może być efektywnie wykorzystywany do ładowania zewnętrznych akumulatorów chemicznych. Zgromadzona energia elektryczna, pozyskiwana przez ogniwa fotowoltaiczne, może służyć do zasilania odbiorników elektrycznych na pokładzie pojazdu w momentach braku dostępu do światła słonecznego. Taka praktyka skutkuje zmniejszeniem zużycia paliwa i emisji szkodliwych substancji. W przypadku dłuższego postoju pojazdu system musi także zabezpieczyć akumulatory przed nadmiernym naładowaniem oraz umożliwić przekazanie nadmiaru energii do innego źródła.

W ogólności system fotowoltaiczny pojazdu powinien nieprzerwanie zaspokajać zapotrzebowanie na energię, co ma wpływ na aspekt ekonomiczny.

Jednak głównym wyzwaniem praktycznym w zastosowaniu technologii fotowoltaicznej w pojazdach jest opłacalność montażu systemu i czas jego zwrotu, który zależy od mocy systemu, jego wydajności oraz rzeczywistego zapotrzebowania na energię elektryczną w pojeździe. Koszt systemu rośnie wraz z mocą instalacji fotowoltaicznej, ograniczoną jednocześnie powierzchnią dachu. Ilość wyprodukowanej energii elektrycznej zależy od warunków eksploatacji pojazdu, takich jak rodzaj trasy (miejska, autostradowa), godziny poruszania się (dzień lub noc), a także lokalizacja geograficzna pojazdu (miasto, obszary pozamiejskie, szerokość geograficzna).

Każde ogniwo fotowoltaiczne podlega różnorodnym warunkom oświetlenia podczas ruchu pojazdu, gdzie dynamika zmian światła słonecznego jest znacznie wyższa niż w przypadku stałych instalacji. Skuteczność ogniw PV może ulec pogorszeniu w obszarach o złym oświetleniu, takich jak miejskie ulice zacienione przez wysokie budynki, drzewa czy inne struktury, a także w wyniku zmniejszonej przejrzystości powietrza nad drogą. W analizie przedstawionej w artykule [96], dotyczącej instalacji o mocy 1,8 kW zamontowanej na dachu autobusu, stwierdzono, że energia odnawialna pokrywa 26% zapotrzebowania na energię elektryczną autobusu w warunkach środkowo-wschodniej Polski. Szacuje się, że taka instalacja zwróci się w ciągu 3 lat użytkowania, przyczyniając się do średniej rocznej oszczędności paliwa na poziomie 3% [224], zastępując energię uzyskiwaną z konwersji chemicznej paliwa na energię elektryczną w alternatorze.

5.4. Pozycja Słońca i oświetlanego obiektu

Umieszczenie ogniw fotowoltaicznych na dachu autobusu w pozycji horyzontalnej jest koniecznością. Niemniej takie ustawienie wpływa na produktywność ogniw, ponieważ dostęp do bezpośredniej energii słonecznej zależy głównie od kąta padania θ (Ryc. 5.1). Stanowi on różnicę między promieniem słonecznym a prostopadłą do powierzchni odbijającej światło. Charakterystyczne natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą G , które dociera do nachylonej powierzchni, jest niższe w zależności od kosinusa kąta padania θ . Powierzchnia skierowana równolegle do promieni słonecznych w kosmosie nie otrzymuje żadnego natężenia promieniowania słonecznego:

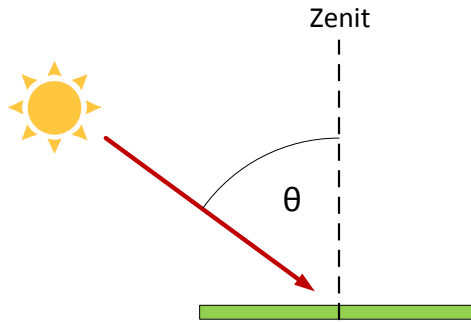
$$G = G_b - G_b \cdot \cos\theta \quad (5.1)$$

gdzie:

- G – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [W/m^2],
- G_b – bezpośrednie natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą [W/m^2],
- θ – kąt padania promieni słonecznych.

Oznacza to, że im bardziej powierzchnia jest nachylona w stosunku do promieni słonecznych, tym mniej energii słonecznej jest w stanie otrzymać. W przypadku horyzontalnego umieszczenia ogniw na dachu autobusu efektywność pozyskiwania energii słonecznej jest ograniczona, co prowadzi do niższej produktywności systemu fotowoltaicznego.

Mimo tych ograniczeń, konieczność umieszczenia ogniw w pozycji horyzontalnej na dachu autobusu wynika z praktycznych uwarunkowań. W związku z tym projektowanie systemów fotowoltaicznych w pojazdach musi uwzględniać te ograniczenia, by minimalizować straty wydajności i jednocześnie wykorzystywać dostępne źródła energii słonecznej w jak najbardziej efektywny sposób.

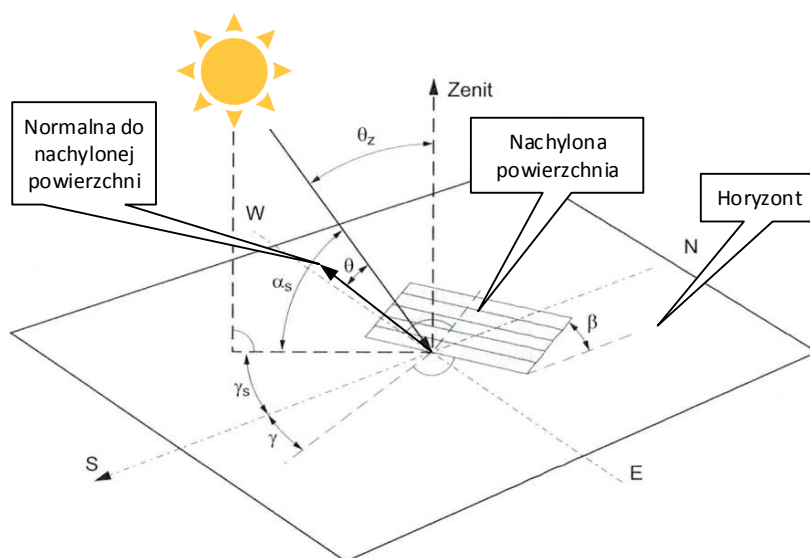


Ryc. 5.1. Definicja kąta padania promieni słonecznych

Optymalna pozycja systemu opartego na energii słonecznej zależy od pozycji Słońca i orientacji nachylonej płaszczyzny pod kątem β , na którą padają promienie słoneczne. Na rycinie 5.2 przedstawiono płaszczyznę zwróconą w kierunku równika, gdzie Słońce jest odchylone od kierunku południowego o kąt azymutalny γ . Zaznaczono na nim normalną do płaszczyzny absorbującej promieniowanie słoneczne, normalną do horyzontu oraz kąty padania promieniowania bezpośredniego θ i kąt zenitalny θ_z .

Kąt wzniesienia Słońca α_s to kąt pomiędzy płaszczyzną horyzontu a linią prowadzoną w stronę Słońca (zgodną z kierunkiem padania promieniowania bezpośredniego). Kąt zenitalny θ_z , przeciwny do kąta wzniesienia ($90^\circ - \alpha_s$), zawiera się między normalną do powierzchni poziomej Ziemi a kierunkiem promieniowania bezpośredniego. Przy wysokości Słońca równającej się 90° Słońce znajduje się w zenicie, a kąt zenitalny wynosi zero.

Kąt azymutalny γ_s (azymut Słońca) mierzy kąt zgodnie z ruchem wskazówek zegara, pomiędzy geograficzną północą a punktem na horyzoncie bezpośrednio pod Słońcem (na końcu linii biegnącej od środka Słońca do horyzontu). Odchylenie na półkuli północnej w stronę wschodnią jest ujemne, natomiast w stronę zachodnią dodatnie. Optymalna orientacja płaszczyzny absorbującej promieniowanie słoneczne będzie zależała od tych kątów, co wpływa na efektywność gromadzenia energii słonecznej.

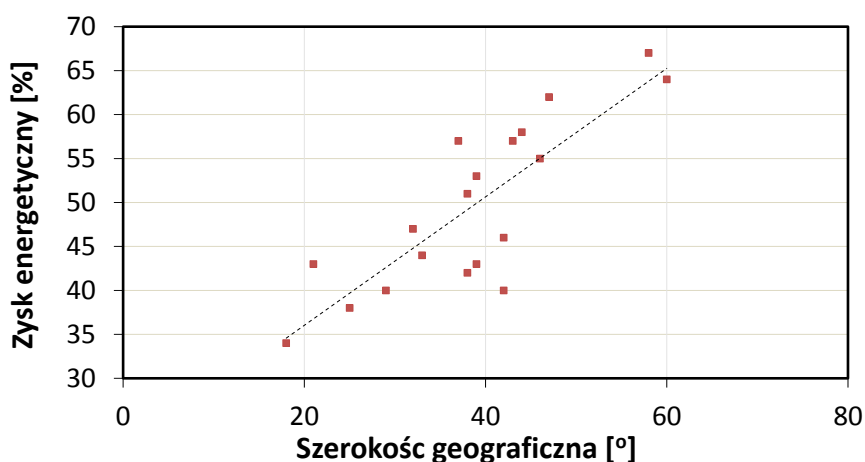


Ryc. 5.2. Kąty definiujące położenie Słońca i orientację nachylonej płaszczyzny

Kąt padania θ promieni słonecznych na nachyloną płaszczyznę zależy od wszystkich powyższych kątów. Jak wspomniano wcześniej, maksymalne natężenie promieniowania można zazwyczaj uzyskać, gdy powierzchnia jest prostopadła do Słońca. Jednak ze względu na zmieniające się położenie Słońca w ciągu dnia i roku jedynie dwuosiowa, śledzona powierzchnia jest w stanie uzyskać maksymalne natężenie promieniowania. Roczne nasłonecznienie na takiej powierzchni może być wyższe o ponad 30% w porównaniu do

powierzchni nieśledzonej, podczas gdy dla jednoosiowej powierzchni śledzonej zysk wynosi około 20%. W obszarze równikowym optymalna orientacja powierzchni nieśledzonej jest prawie pozioma. Na półkuli północnej powinna być nachylona w kierunku południowym, a na półkuli południowej w kierunku północnym. Optymalny kąt nachylenia β zwiększa się przy wyższych szerokościach geograficznych, a zimą jest wyższy niż latem.

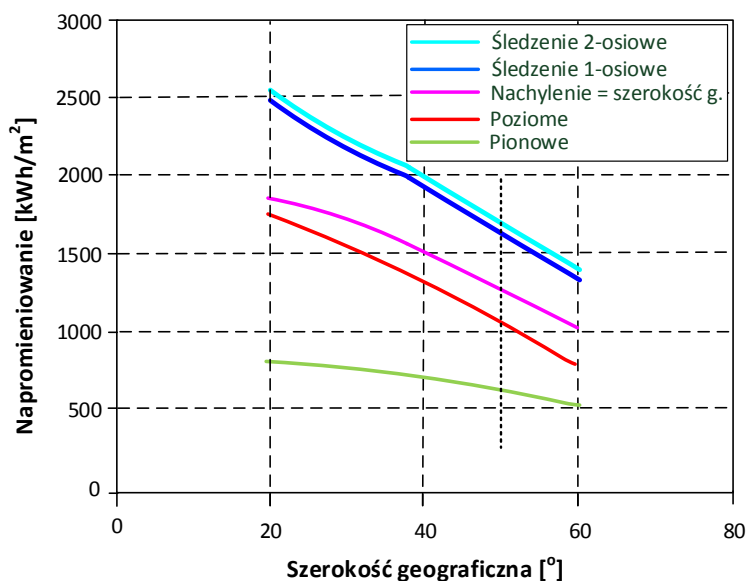
Przelicznik energii słonecznej PVWATT [153] oparty na analizie danych promieniowania słonecznego z około 30 lat dla miast w USA został użyty do oszacowania względnego zysku średniej rocznej energii słonecznej docierającej do płaskiej powierzchni oraz dla dwuosiowego układu śledzenia Słońca. Wyniki przedstawiono na rycinie 5.3 dla różnych szerokości geograficznych. Okazuje się, że zastosowanie ruchomych modułów może znacząco poprawić roczną energię słoneczną, zwłaszcza na dużych szerokościach geograficznych. Względny zysk zależy także od miesiąca: na przykład w Los Angeles minimalny zysk (około 21%) występuje latem, podczas gdy maksymalna wartość, do 100%, jest osiągnięta zimą. Frakcja energii odbitej ma również istotny wpływ na wychwytywaną energię: energia odbita przez powierzchnię Ziemi nie wpływa na poziomy moduł, podczas gdy może być częściowo przechwytywana przez nachylony moduł.



Ryc. 5.3. Procentowy zysk w rocznej energii słonecznej docierającej do dwuosiowej płaszczyzny skierowanej prostopadle do promieniowania w porównaniu do płaszczyzny poziomej. Na podstawie [153]

Na rycinie 5.4 przedstawiono roczną sumę natężenia promieniowania słonecznego dla różnych szerokości geograficznych w przypadku powierzchni nachylonej poziomo, pionowo, podążającej za Słońcem w jednej i dwóch osiach. Pionową linią przerywaną zaznaczono szerokość geograficzną Polski. Należy zauważyć, że najmniej korzystna jest pionowa pozycja płaszczyzny, na którą oddziałuje Słońce. Z kolei układy nadążne są kosztowne i nie zawsze mogą być stosowane na wszystkich budynkach. W przypadku pojazdów panele fotowoltaiczne są zazwyczaj umieszczane na dachu (poziomo) lub na powierzchniach bocznych (pionowo). Pozycja pozioma pozwala w pełni wykorzystać promieniowanie rozproszone dochodzące z widnokładu.

W kontekście budynków i farm słonecznych zlokalizowanych w Polsce panele fotowoltaiczne skierowane na południe są pochylane w zakresie kątów od 30° do 40° . W rejonach południowych odpowiednie kąty nachylenia oscylują w zakresie niższych wartości (bliżej 30°), natomiast na północy bliżej im do 40° [212]. Wybór odpowiedniego kąta nachylenia zależy od lokalizacji geograficznej i ma istotny wpływ na efektywność wychwytywania energii słonecznej.



Ryc. 5.4. Roczna suma natężenia promieniowania słonecznego dla różnych szerokości geograficznych. Na podstawie [212]

5.5. Nierównomierność natężenia promieniowania słonecznego

Badania przeprowadzone przez autorów na autobusach miejskich w Lublinie potwierdziły, że zacienianie modułów PV wpływa negatywnie na produktywność poruszającego się systemu w porównaniu do systemu stacjonarnego, skutkując o 17% mniejszą wydajnością [89]. Promieniowanie słoneczne jest silnie zależne od pory roku, pory dnia oraz innych czynników geograficznych. Dodatkowo na pojeździe występuje utrudnione oświetlenie modułów ze względu na obiekty zabudowy, drzewa oraz zmniejszoną przezroczystość. Ruchomy pojazd generuje złożone zmiany oświetlenia poszczególnych ogniw, przy czym dynamika tych zmian jest znacznie większa niż w przypadku modułu nieruchomego. Warto również uwzględnić częściowe zacienienie spowodowane elementami konstrukcyjnymi dachu, takimi jak agregaty klimatyzacji, wywietrzniki, szyberdachy czy elementy zabudowy komory silnika, anteny.

Produkowane moduły fotowoltaiczne zazwyczaj mają 3 diody bocznikujące, połączone równolegle z 20–24 ogniwami. Każdy z trzech fragmentów modułu pracuje niezależnie, co pozwala na maksymalizację uzysku energii w przypadku lokalnych zacienień, które wpływają tylko na jeden z łańcuchów, a nie na cały moduł. Wykorzystanie pojedynczej diody wiązałoby się z wyłączeniem całego modułu w przypadku punktowego zacienienia. W mobilnych zastosowaniach utrzymanie wysokiej produktywności poszczególnych modułów jest kluczowe, szczególnie w zurbanizowanym otoczeniu, gdzie wiele obiektów, masztów i słupów infrastruktury drogowej może zacieniać dach autobusu, co staje się wyzwaniem.

System fotowoltaiczny wspomaga instalację elektryczną pojazdu tylko w ciągu dnia i robi to efektywnie w poszczególnych szerokościach geograficznych w różnym czasie w ciągu doby. Podczas pokonywania trasy w aglomeracji miejskiej moduły fotowoltaiczne ulegają częściowemu bądź całkowitemu zacienieniu [197]. System fotowoltaiczny na poruszającym się w warunkach miejskim autobusie generuje około 18% mniej energii w stosunku do identycznego systemu stacjonarnego umieszczonego na otwartej przestrzeni [96]. Dynamika zmian oświetlenia powoduje, że konieczne jest adaptacyjne śledzenie punktu pracy ogniw, zapewniające maksymalną moc [170]. Należy również dopasować liczbę regulatorów prądowych tak, aby uzyskać maksymalną produktywność nierównomiernie oświetlonych ogniw przy minimalnej liczbie regulatorów. W przypadku małej powierzchni zakrzywionego dachu pojazdu samochodowego może wystąpić niekorzystny efekt zróżnicowanej mocy generowanej

przez ogniwa fotowoltaiczne ustawione pod różnym kątem do padającego promieniowania słonecznego. W sytuacji, gdy ogniwa połączone szeregowo w jeden moduł są narażone na nierównomierne oświetlenie, ilość wytwarzanej energii może spaść nawet o ponad połowę ilości odbieranego światła.

Dlatego też, opierając się na właściwościach ogniw słonecznych, moduły słoneczne są zazwyczaj produkowane jako płaskie, aby wszystkie ogniwa były wystawione na działanie jednakowej ilości światła. Dach ciężarówki czy autobusu jest prawie płaski, co sprawia, że ma on przewagę nad zakrzywioną powierzchnią dachu samochodu osobowego.

System fotowoltaiczny na dachu pojazdu może być narażony na większe zacielenia niż system umieszczony na otwartej przestrzeni na dachu budynku czy na konstrukcji na gruncie. Niemniej ma korzystny współczynnik wydajności, który odzwierciedla stosunek rocznej produkcji energii elektrycznej dostarczanej do urządzenia prądem przemiennym AC do teoretycznej rocznej wyprodukowanej energii elektrycznej z systemu fotowoltaicznego w postaci prądu stałego DC. Optymalny system PV minimalizuje straty, co przekłada się na wysoką produktywność. Ponad 90% energii elektrycznej z systemu fotowoltaicznego zintegrowanego z pojazdem może zasilić odbiorniki elektryczne na jego pokładzie [3]. Natomiast 80% i 75% energii elektrycznej przekazywane są do sieci elektroenergetycznej w przypadku farm fotowoltaicznych oraz zintegrowanych z budynkami [11], [81]. Wydajność systemu PV znacznie się poprawiła, a obecnie typowy współczynnik wydajności mieści się w zakresie od 80% do 90% [76]. Współczynnik ten dla systemu PV na pojeździe jest wyższy niż dla aplikacji naziemnych i dachowych, ponieważ system elektryczny wykorzystuje prąd stały, eliminując straty na falowniku.

Stan czystego nieba, czyli *clear sky conditions*, zazwyczaj definiuje się jako brak widocznych chmur na całej kopule nieba, a natężenie promieniowania czystego nieba odpowiada natężeniu promieniowania występującemu w tych warunkach (podczas widocznego operowania Słońca). Precyzyjniejsza definicja natężenia promieniowania czystego nieba w dużej mierze opiera się na ocenie sytuacji. Nawet w przypadku braku widocznych chmur, aerozoli, opadów atmosferycznych i innych warunków atmosferycznych mogą one różnić się w czasie i przestrzeni, wpływając na przepuszczalność promieniowania słonecznego przez atmosferę. W związku z tym istnieje kilka innych sposobów dokładnego zdefiniowania stanu czystego nieba i natężenia promieniowania. Wiele metod wykrywania jasnego nieba opiera się na mierzonych wartościach natężenia promieniowania. W pracy [233] przedstawiono przegląd kilku algorytmów detekcji czystego nieba oraz oceniono dokładność dziewięciu metod.

Najprostszą metodą identyfikacji warunków na jasnym niebie jest porównanie indeksu przejrzystości atmosfery, oznaczonego jako k_T , który definiuje się jako stosunek całkowitego natężenia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi do natężenia promieniowania pozaziemskiego na płaszczyźnie równoległej.

$$k_T = \frac{G}{G_o} \quad (5.2)$$

Autorzy zastosowali różne wartości progowe dla definiowania czystego nieba: 0,6 [149], 0,65 [46], [47] lub 0,7 [123], [130]. Stosunek promieniowania rozproszonego do globalnego promieniowania słonecznego, oznaczony jako k_T , może również być stosowany do identyfikowania czystego nieba [175], przy czym proponowana wartość jest mniejsza niż 0,27 [123], [130]. Stosunek natężenia oświetlenia zenitu do natężenia oświetlenia rozproszonego w poziomie może być również stosowany do identyfikacji czystego nieba [131]. Inni autorzy [163], [164] zaproponowali zastosowanie bardziej wyrafinowanych miar jasności nieba, na przykład określenie jasności nieba ε ($\varepsilon = 6,2$) z wykorzystaniem natężenia promieniowania rozproszonego G_d i promieniowania bezpośredniego G_b , przy czym uwzględnia się kąt zenitalny Θ_z .

$$\varepsilon = \frac{(G_d + \frac{G_b}{\cos\theta_z} \cdot G_d + 1,041 \cdot \theta_z^3)}{1 + 1,041 \cdot \theta_z^3} \quad (5.3)$$

Oprócz podziału na okresy jasne i pochmurne niektórzy autorzy dokonują również klasyfikacji typów chmur na podstawie mierzonego natężenia promieniowania całkowitego i rozproszonego. Wskazują na użyteczność wskaźnika jasności, ułamka rozproszenia oraz krótkotrwałej zmienności całkowitego natężenia promieniowania G i rozproszonego natężenia promieniowania G_d w celu klasyfikacji stopnia zachmurzenia nieba, korzystając z nadzorowanych technik klasyfikacji [35], [162]. Natomiast inni badacze [103] wykorzystują G i G_d do oceny ilości chmur oraz różnicowania między typami chmur warstwowych i konwekcyjnych. Wykorzystanie czteropasmowego naziemnego fotometru słonecznego może służyć do detekcji i klasyfikacji chmur [53]. Inne metody opierają się na zmienności w serii pomiarów natężenia promieniowania w celu sklasyfikowania okresu jako wskaźnika zmienności [136] lub prawdopodobieństwa jego wystąpienia [119]. Autorzy [59] wykorzystują średni wskaźnik

przejrzystości oraz odchylenie standardowe natężenia promieniowania w oknie czasowym 21 minut do klasyfikacji 7 typów chmur.

Long i Ackerman [132] przedstawili szczegółowe podejście obejmujące cztery badania wykorzystujące natężenie promieniowania słonecznego całkowite i rozproszone, które razem wykrywają wszystkie warianty zachmurzenia. Testy te to: (1) badanie granicy całkowitego znormalizowanego promieniowania krótkofalowego; (2) badanie maksymalnej wartości promieniowania krótkofalowego rozproszonego; (3) badanie zmiany wielkości fali krótkofalowej w czasie; oraz (4) badanie zmienności znormalizowanego współczynnika rozproszenia. Ich metoda jest przeznaczona dla danych o wysokiej częstotliwości (rozdzielczość poniżej 15 minut) i wykorzystuje metodę iteracyjną do określania wartości progowych. Ich metoda stała się standardem w społeczności pomiarów słonecznych, na przykład dla kontroli jakości danych.

Warunki czystego nieba mogą być również określane za pomocą innych narzędzi niż pomiary natężenia promieniowania. Przykładowo stosuje się skanowanie natężenia oświetlenia nieba [138], porównywanie wyników detekcji chmur za pomocą pomiarów promieniowania krótko- i długofalowego, metodę pomiaru rozpraszania wstecznego [60], a także wykorzystanie długofalowego i krótkofalowego promieniowania padającego w połączeniu z temperaturą i wilgotnością powietrza [139]. Pokrywę chmur szacuje się za pomocą radaru naziemnego [105] lub wykorzystując promieniowanie krótkofalowe i długofalowe do wykrywania rodzaju chmury, stopnia zachmurzenia i wysokości chmury [159]. Ostatnio stosuje się również rejestratory obrazu nieba do detekcji chmur i klasyfikacji ich nieprzezroczystości [90].

Wahania skumulowanej mocy z systemów fotowoltaicznych różnią się w zależności od globalnych wahań promieniowania słonecznego. Ze względu na stochastyczny charakter i zróżnicowanie rozkładu chmur natężenie promieniowania słonecznego podlega dziennie ogromnym zmianom, o wartościach sięgających nawet 700 W/m^2 , występujących w skalach czasowych od kilku sekund do kilku minut, szczególnie w klimacie tropikalnym. Z tego powodu dokładna znajomość globalnych wahań natężenia promieniowania słonecznego ma istotne znaczenie praktyczne w zarządzaniu siecią elektryczną. Wiele badań skoncentrowano na klasyfikacji codziennego globalnego promieniowania słonecznego w różnych warunkach pokrycia chmur, wykorzystując różne metody, takie jak wymiary fraktalne [135], mieszanki rozkładów [194] oraz techniki matematyczne morfologii [86]. Te metody i kryteria klasyfikacji zazwyczaj zakładają określoną liczbę klas. W badaniu [48] przeprowadzono parametryzację codziennego promieniowania słonecznego, korzystając

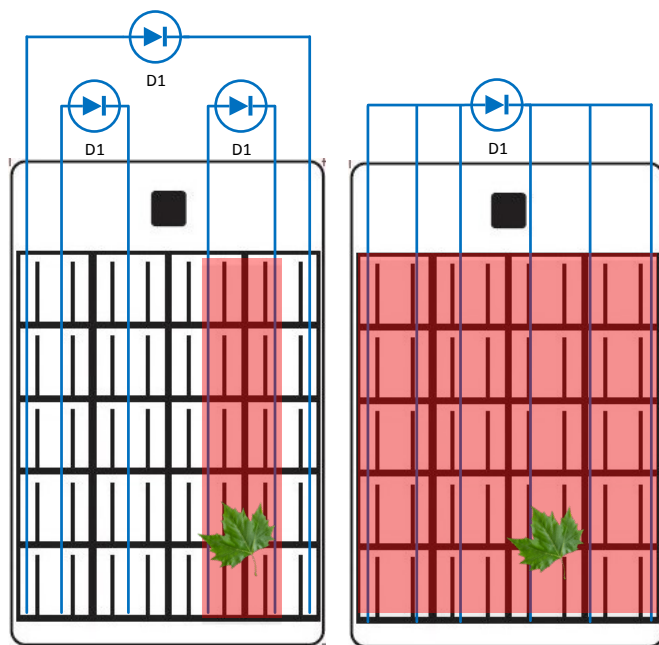
z klasycznych wskaźników, takich jak matematyczny współczynnik zawartości harmonicznym oraz wskaźnik statystyczny (oparty na koncepcji odchylenia standardowego). Ten statystyczny estymator opisuje średni poziom zmienności [187], [142].

Promieniowanie słoneczne rejestrowane na poziomie gruntu jest zjawiskiem naturalnym, które obejmuje wiele nieliniowych procesów dynamicznych, takich jak turbulencje, obszary chmur i wiatr w atmosferycznej warstwie brzegowej. Istnienie struktury wielofraktalnej może być istotne dla charakterystyki dużej zmienności dziennych sekwencji globalnego promieniowania słonecznego. W badaniach [184], [220] zwrócono uwagę na skalowalność i multifraktalne właściwości chmur na szerokim zakresie skal. W pracy [40], [133] badano skalowalność i multifraktalne właściwości wiatru atmosferycznego w zakresie mezoskalowym w warstwie granicznej. To z kolei stanowiło motywację do przeprowadzenia analizy multifraktalnej dziennych globalnych sekwencji promieniowania słonecznego, co jest pierwszym kompletnym badaniem właściwości multifraktalnych tych fluktuacji.

W pracy [188] w celu opisanie fluktuacji dane dotyczące promieniowania słonecznego zostały przeanalizowane we wszystkich skalach i natężeniach (niskich, średnich i wysokich) przy użyciu uniwersalnych multifraktali. Do tego celu wykorzystano wykładnik skalowania $\zeta(q)$, który charakteryzuje zachowanie skali lub mierzy odległość między procesem monofraktalnym a multifraktalnym. Jeśli $\zeta(q)$ jest liniowy, to rozpatrywany proces jest monofraktalny, natomiast nieliniowy $\zeta(q)$ wskazuje na wielofraktalność procesu. Ponadto wklęsłość krzywej dostarcza informacji o stopniu nieciągłości: im bardziej wklęsła krzywa, tym bardziej nieciągły jest proces [187], [80], [218]. Istnieje kilka metod szacowania skalowania wykładników $\zeta(q)$: analiza funkcji struktury, metody falowe, analiza fluktuacji oderwanych lub wielofraktalna analiza fluktuacji oderwanych, analiza spektralna dowolnego rzędu Hilberta oraz rozszerzenie transformacji Hilberta [109].

Jednak opisane metody nie są wystarczające do pełnego opisanie wahań danego procesu we wszystkich jego stopniach intensywności i skalach, uwzględniając zdarzenia ekstremalne, które mogą intensyfikować ruch pojazdu, powodując zacienianie powierzchni panelu fotowoltaicznego oraz utratę lub całkowity spadek jego produktywności. W przypadku zastosowań mobilnych utrzymanie wysokiej produktywności poszczególnych modułów jest niezwykle istotne, zwłaszcza w terenie zurbanizowanym, gdzie obecność wielu budynków, masztów oraz słupów infrastruktury drogowej może powodować zacienienie dachu autobusu, co staje się wyzwaniem. Nawet punktowe

zacinienie jednego ogniwa (ryc. 5.5), spowodowane na przykład przyklejeniem się liścia lub innego zanieczyszczenia, może skutkować wyłączeniem całego panelu w przypadku paneli z jedną diodą bocznikującą. W przypadku konstrukcji z trzema diodami, punktowe zacinienie powoduje jedynie częściowy, wynoszący około 33%, spadek mocy (ryc. 5.5). Obecnie dostępne na rynku panele fotowoltaiczne zazwyczaj mają trzy diody bocznikujące połączone równoległe z zestawem składającym się z 20–24 ogniw. Takie rozwiązanie umożliwia niezależną pracę każdego z trzech fragmentów panelu, co ma istotne znaczenie w przypadku zacinienia. Większa liczba diod bocznikujących przyczynia się do maksymalizacji uzysku energii z panelu fotowoltaicznego, ponieważ w przypadku punktowego zacinienia wyłączony zostaje tylko jeden łańcuch, a nie cały panel [206].



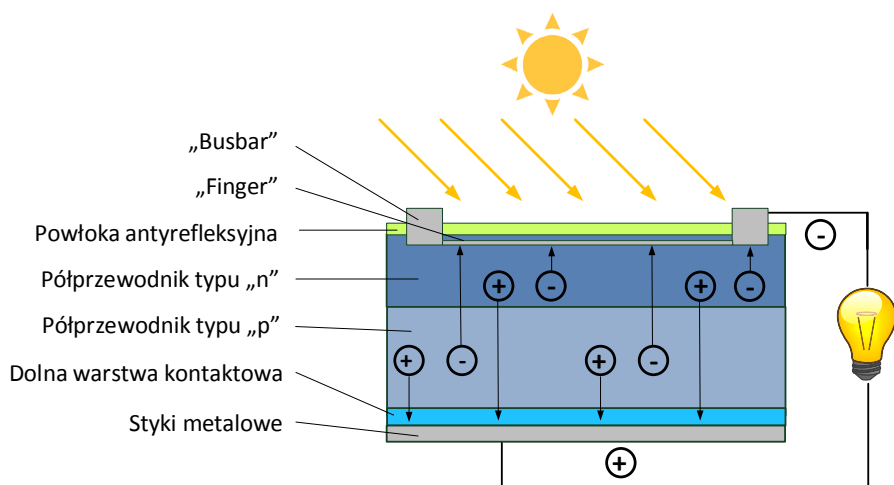
Ryc. 5.5. Skutek zacinienia liściem fragmentu panelu fotowoltaicznego w przypadku jednej diody oraz trzech

6. Technologia paneli fotowoltaicznych

6.1. Budowa i zasada działania

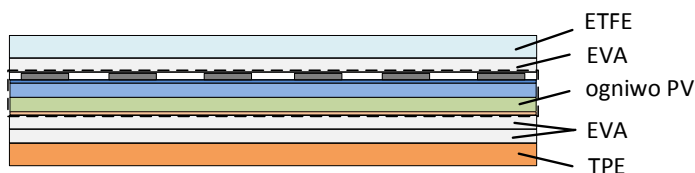
Ogniwo fotowoltaiczne to element półprzewodnikowy, który przetwarza energię promieniowania (światło słoneczne) na energię elektryczną. Zasada jego działania została przedstawiona na rycinie 6.1. Proces ten wymaga, po pierwsze, materiału, w którym absorpcja światła podnosi elektron do wyższego stanu energetycznego, a po drugie ruchu tego wysokoenergetycznego elektronu z ogniwa słonecznego w obwód zewnętrzny (obciążenie). Następnie elektron rozprasza swoją energię w obciążeniu (wytwarza prąd i napięcie) i wraca do ogniwa słonecznego.

Ogniwo fotowoltaiczne oparte na krzemie ma budowę złącza półprzewodnikowego typu p-n, czyli dwóch połączonych ze sobą półprzewodników: p i n. Pomiędzy półprzewodnikami powstaje bariera potencjałów, przez którą elektrony (-) z obszaru n i dziury (+) z obszaru p nie mogą się przemieszczać, gdy na układ nie pada światło słoneczne – w złącze nie uderzają fotony. Oddziaływanie światła słonecznego na powierzchnię ogniwa wywołuje wybijanie elektronów z orbit walencyjnych. W zewnętrznym obwodzie elektrycznym, łączącym złącza p i n, przepływa prąd elektryczny na skutek nieustannego wybijania elektronów przez fotony i rekombinacji związanej z przemieszczaniem się dziur w półprzewodniku.



Ryc. 6.1. Zasada działania ogniwa fotowoltaicznego

Na rycinie 6.2 przedstawiono przekrój poprzeczny elastycznego modułu fotowoltaicznego. Ogniwa fotowoltaiczne z metalowymi elektrodami, wcześniej przedstawione na rycinie 6.1, są hermetyzowane folią EVA, a następnie ułożone na warstwie tylnej z elastomeru termoplastycznego (TPE). Górną warstwę stanowi lekkie i elastyczne tworzywo ETFE, które w klasycznych modułach sztywnych zastępuje szkło. Materiał warstwy tylnej wykonany jest z różnych polimerów lub tworzyw sztucznych, takich jak polipropylen, polietylen i poliflorek winylu, które oferują różne poziomy ochrony, stabilności termicznej i długotrwałej odporności na promieniowanie UV. Warstwa spodnia zazwyczaj jest białego koloru, ale w zależności od producenta i modułu może być również przezroczysta lub czarna. Końcowa warstwa zewnętrzna pełni rolę bariery przeciwwilgociowej oraz zapewnia zarówno ochronę mechaniczną, jak i izolację elektryczną.



Ryc. 6.2. Przekrój poprzeczny przez elastyczny moduł fotowoltaiczny, ETFE – folia z kopolimeru etylenu i żywicy tetrafluoroetylenowej, EVA – folia na bazie octanu etylenowo-winylowego, TPE – tylna warstwa z elastomeru termoplastycznego

Folia EVA (octan etylenowo-winyłowy) jest specjalnie zaprojektowaną, wysoce przezroczystą warstwą polimerową używaną do hermetyzacji ogniw fotowoltaicznych i utrzymania ich we właściwym położeniu podczas produkcji. Jest niezwykle trwała i odporna na ekstremalne warunki temperaturowe i wilgotność, co odgrywa kluczową rolę w długoterminowej wydajności ogniwa poprzez zapobieganie przenikaniu wilgoci i zanieczyszczeń. Laminacja obu stron ogniw PV zapewnia pewną absorpcję wstrząsów i pomaga chronić ogniwa oraz przewody łączące przed wibracjami i uderzeniami (np. kamieniami bądźż innymi przedmiotami). Wysokiej jakości folia EVA o wysokim stopniu usieciowania może decydować o trwałości lub uszkodzeniu panelu z powodu wnikania wody. W procesie produkcji ogniwa najpierw pokrywa się je folią EVA, a następnie montuje w przedniej i tylnej warstwie.

Folie ETFE (etyleno-tetrafluoroetylen) są produkowane z kopolimeru etylenu i żywicy tetrafluoroetylenowej w procesie wytłaczania. Mogą być one zgrzewane na gorąco, termoformowane i laminowane do różnych podłoży, co zapewnia skuteczną ochronę ogniw przed obciążeniami, naprężeniami, wilgocią i czynnikami atmosferycznymi. Folie ETFE łączą w sobie doskonałą elastyczność chemiczną i termiczną standardowych fluoropolimerów z wydajnością mechaniczną charakterystyczną dla tworzyw sztucznych klasy inżynierskiej. Mają one również doskonałe właściwości przepuszczania światła (90–95% przezroczystości) oraz stabilność w zakresie światła ultrafioletowego. Są również samoczyszczące i mogą być zintegrowane z matową powierzchnią, aby minimalizować odbicia światła i jednocześnie maksymalizować absorpcję energii świetlnej.

Powierzchnia ogniwa jest pokrywana warstwą antyrefleksyjną z azotku krzemu. Grubość podłoża stosowanego w większości standardowych ogniw krystalicznych wynosi od 160 do 240 mikrometrów, ale obecnie panuje tendencja zmniejszania jej do mniej niż 120 mikrometrów. Powierzchnia czołowa komórki jest teksturyzowana, aby zmniejszyć straty odbicia światła padającego, i nakładana jest na nią warstwa antyodbłaskowa z azotku krzemu lub tlenku tytanu, aby dodatkowo ograniczyć odbicia.

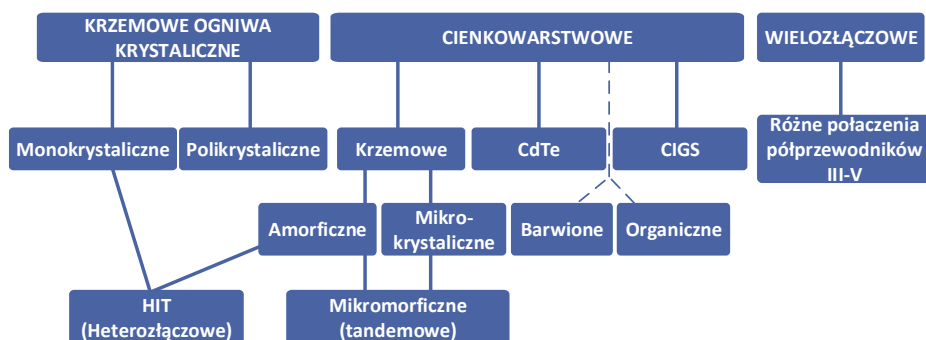
6.2. Rodzaje ogniw fotowoltaicznych

Wiele typów ogniw słonecznych zostało już opracowanych w laboratoriach w celu zwiększenia wydajności i obniżenia kosztów. Podstawową różnicą pomiędzy nimi jest zastosowany materiał półprzewodnikowy oraz ich struktura krystaliczna (skrystalizowana lub amorficzna).

Materiały półprzewodnikowe mają duży potencjał energetyczny, co może utrudniać wybijanie elektronów walencyjnych. Dlatego strukturę fotoogniw wzbogaca się między innymi fosforem i borem, które obniżają potencjał elektryczny (przerwę energetyczną). Krystaliczne ogniwa słoneczne z krzemu mają na powierzchni czołowej podłoże absorbujące elektrony typu p z domieszką boru oraz obszary n+ wzbogacane fosforem, wytwarzające elektrony, które razem tworzą połączenia p-n. W dolnej warstwie kontaktowej, posrebrzanej od góry i aluminiowej od spodu, tworzą się obszary pola p+, które tłumią zjawisko rekombinacji nośników mniejszościowych (fotogenerowanych elektronów). Nośniki (elektrony) generowane w warstwach krzemu masowego i dyfuzyjnego są zbierane przez srebrne styki (elektrody) formowane na przedniej i tylnej powierzchni krzemu. Przedni styk w postaci metalowej elektrody składa się z siatki cienkich przewodów (ang. *finger*) połączonych szyną zbiorczą (ang. *busbar*) w celu utworzenia struktury w kształcie grzebienia.

Na rycinie 6.3 przedstawiono podstawowe technologie produkcji ogniw fotowoltaicznych, które można podzielić na 3 główne grupy. Pierwsza z nich bazuje na krzemie krystalicznym, którego cienkie warstwy o grubości 180 μm mogą być osadzane na sztywnych lub elastycznych podłożach. Krzem, będący drugim najobfitszym pierwiastkiem w skorupie ziemskiej, jest dobrze zbadany i zrozumiały w układzie okresowym, dlatego też jest dominującym materiałem ogniw fotowoltaicznych [192]. Ogniwa słoneczne z krzemu krystalicznego osiągają najwyższą wydajność, jednak produkcja wysokiej czystości krzemu wymaga stosunkowo dużych ilości energii i niesie ze sobą wysokie koszty. Druga grupa opiera się na technologii cienkowarstwowej, która wymaga znacznie mniejszej ilości materiału i jest tym samym tańsza. W warunkach przemysłowych nie osiąga tak wysokich sprawności jak ogniwa krzemowe, występują też problemy z dostępnością i toksycznością niektórych materiałów. Stosuje się półprzewodniki w postaci krzemu amorficznego (a-Si) i mikrokryształicznego ($\mu\text{c-Si}$), dyselenek indu miedzi (CIS) oraz tellurek kadmu (CdTe). Do tej grupy należą również nowe technologie, które nie osiągnęły jeszcze etapu komercyjnego. Głównie są to organiczne ogniwa słoneczne. Trzecia grupa obejmuje ogniwa wielowęzłowe/wielozłączowe (tzw. *multijunction*).

W 2019 roku krzem stanowił 95% całkowitej mocy 40 GW wyprodukowanych modułów fotowoltaicznych. Z kolei moduły cienkowarstwowe, złożone z tellurku kadmu (CdTe), selenku indu miedzi i galu (CIGS) oraz krzemu amorficznego (a-Si), stanowiły pozostałe 5%. Ponad 60% ogniw opartych na krzemie to ogniwa polikrystaliczne [76].



Ryc. 6.3. Podstawowe technologie produkcji ogniw fotowoltaicznych, CdTe – ogniwa na bazie tellurku kadmu, CIGS – ogniwa na bazie cienkiej warstwy miedzi, indu, galu, selenu

Produkcja cienkowarstwowych modułów fotowoltaicznych funkcjonuje na rynku od kilku lat, jednak nadal utrzymuje stosunkowo mały udział w ogólnej sprzedaży. Główne technologie w użyciu to: CdTe (tellurek kadmu), CIGS, CIS, krzem amorficzny (a-Si) oraz mikrokrystaliczny (μ -Si). Zaletą modułów amorficznych, oprócz obfitości krzemu, jest to, że zarówno narzędzia produkcyjne, jak i techniki stosowane do składowania a-Si i materiałów pokrewnych są podobne do tych stosowanych w produkcji wyświetlaczy ciekłokrystalicznych. Są one również lepsze od dużych modułów krzemowych PV pod względem wpływu temperatury na wydajność ogniwa. Główną wadą modułu a-Si jest niska wydajność, która może być jednak zwiększona przy wykorzystaniu wielostykowych ogniw słonecznych.

6.3. Analiza dostępnych rozwiązań ogniw fotowoltaicznych

6.3.1. Krzemowe ogniwa krystaliczne

Ogniwa monokrystaliczne są wytwarzane z wykorzystaniem metody opracowanej przez polskiego chemika Jana Czochralskiego w 1916 roku. Najwyższej jakości krzem krystaliczny jest przetapiany w sztaby (monokryształy) krzemowe o przekroju kołowym. Następnie wycinane są z nich cienkie płytki, które stają się ogniwami fotowoltaicznymi. Aby zoptymalizować ilość zużytego materiału i rozłożenie płytek na module fotowoltaicznym, ogniwa mają kształt ośmiokąta. Najmniejsze straty materiału powstałyby przy ogniwach

okrągłych, natomiast przestrzeń modułu zostanie najlepiej zagospodarowana, gdy ułożą się na niej płytki prostokątne. Sprawność i trwałość zarówno ogniw mono-, jak i polikrystalicznych zależy od stopnia czystości krzemu, grubości wycinanych płytek oraz technologii ich uszlachetniania.

Ogniwa monokrystaliczne charakteryzują się doskonale regularną strukturą krystaliczną oraz czarnym kolorem. Ogniwa polikrystaliczne składają się z kryształów krzemu o wielkości ziaren zaledwie kilku milimetrów i są w odcieniu niebieskim. Granice ziaren stanowią defekty kryształów, które mogą działać jako drobne bariery i zmniejszać wydajność. Komórki monokrystaliczne charakteryzują się niższym stopniem degradacji wywołanej światłem, a także nieco lepszym współczynnikiem temperaturowym. Ogniwa polikrystaliczne, choć generalnie bardzo niezawodne, mogą być również bardziej podatne na powstawanie mikropęknięć po wielu latach użytkowania.

Wszystkie krystaliczne ogniwa słoneczne (mono i poli) są wykonane z bardzo cienkiej płytki z krzemu bazowego, przy czym dwa główne typy to p i n. Są one produkowane, gdy krzem jest „domieszkowany” specyficznymi pierwiastkami chemicznymi w celu wytworzenia ładunku dodatniego (typu p) lub ujemnego (typu n). Ogniwa krzemowe typu n są droższe w produkcji, ale oferują wyższą wydajność i mniejszą szybkość degradacji spowodowanej światłem, oraz lepszy współczynnik temperaturowy. Pierwiastki chemiczne używane do dopingu to fosfor, który tworzy ładunek dodatni, i bor, który wytwarza ładunek ujemny. W zależności od rodzaju konstrukcji ogniwa jako podstawę lub „podłoże” ogniwa stosuje się krzem domieszkowany typu n lub p.

Zdecydowana większość stosowanych obecnie komórek monokrystalicznych i wielokrystalicznych wykorzystuje krzem domieszkowany borem typu „p”. Obecnie tylko kilku producentów, takich jak LG, Panasonic i SunPower, wykorzystuje wydajne płytki krzemowe typu n, chociaż coraz więcej firm zaczyna opracowywać ogniwa typu n. Oba typy ogniw wykorzystują kombinację krzemu typu p i n, tworzących razem połączenie p-n, które jest fundamentalne dla funkcji ogniwa słonecznego.

Różnica polega na tym, że w ogniwach typu „p” jako podstawę stosuje się domieszkę boru wraz z ultracienką warstwą krzemu typu n, podczas gdy w ogniwach typu n jest odwrotnie i wykorzystuje się krzemową podstawę typu „n” z cienką warstwą typu p. W grupie tej można wyróżnić ogniwa heterozłączowe z wewnętrzną cienką warstwą HJC (ang. *heterojunction*) bazujące na wysokiej czystości monokrystalicznej płytce krzemowej otoczonej ultracienkimi, amorficznymi warstwami krzemu.

Panasonic opracował ogniwo HJC wykorzystujące wysokowydajną krzemową podstawę typu N do produkcji paneli o sprawności do 20,0% i doskonałej wydajności w wysokiej temperaturze – niski współczynnik temperaturowy, który jest o około 40% lepszy od zwykłych komórek poli- i monokrystalicznych. W popularnych ogniwach poli i mono wynosi on od 0,38% do 0,42% na stopień Celsjusza, co w przypadku bardzo gorących, bezwietrznych dni może zmniejszyć całkowitą moc o 20% lub więcej. Dla porównania ogniwa firmy Panasonic mają bardzo niski współczynnik temperaturowy 0,26% na stopień Celsjusza, który jest najniższy spośród wszystkich produkowanych obecnie ogniw. Ogniwa krzemowe typu N oferują również wyjątkową wydajność w długim okresie, gwarantując 90,76% mocy po 25 latach, co jest drugą najwyższą dostępną wydajnością po SunPower.

6.3.2. Ogniwa cienkowarstwowe

Moduły cienkowarstwowe (ang. *thin film*) są modułami fotowoltaicznymi z aktywną warstwą fotoelektryczną o grubości zaledwie kilku mikrometrów, która osadzona jest w technologii cienkowarstwowej, wykorzystującej duży obszar. Stosowane metody osadzania to głównie te powszechnie stosowane do powlekania szkła architektonicznego. Te niezwykle cienkie warstwy nie są samonośne i dlatego muszą być montowane na podłożu. Do tego celu stosuje się zazwyczaj szkło, chociaż używa się również elastycznych folii z tworzyw sztucznych, co daje przewagę w produkcji nad powlekaniami typu „roll-to-roll”. Moduły cienkowarstwowe są mniej wydajne niż te wykonane z ogniw krystalicznych, ale jest to zrównoważone przez następujące zalety:

- Czas zwrotu energii jest stosunkowo krótki ze względu na małą ilość zużytego materiału i energii.
- Proces produkcyjny może być zautomatyzowany dla modułów wielkopowierzchniowych.
- Możliwe jest osiągnięcie wysokiego stopnia integracji pionowej, przy czym konieczne jest wykonanie tylko kilku etapów produkcji.

Elastyczne podłoża otwierają nowe obszary dla produktu i jego integracji w budynkach. Najważniejszą zaletą jest to, że w pełni rozwinięta produkcja, która pozwala na dopasowanie dużych wielkości produkcji i wydajności, przynosi tak duże korzyści kosztowe, że technologia krystaliczna może być równa lub nawet lepsza. Oznacza to, że kWh energii słonecznej może być wyprodukowana przy niższych kosztach.

Produkcja cienkowarstwowych modułów fotowoltaicznych istnieje na rynku od kilku lat, jednak nadal utrzymuje stosunkowo mały udział w ogólnej sprzedaży. Główne technologie w użyciu to CdTe (tellurek kadmu), CIGS, CIS, krzem amorficzny (a-Si) oraz mikrokryształiczny (μ -Si). Zaletą modułów amorficznych, oprócz obfitości krzemu, jest to, że zarówno narzędzia produkcyjne, jak i techniki stosowane do składowania a-Si i materiałów pokrewnych są podobne do tych stosowanych w produkcji wyświetlaczy ciekłokrystalicznych. Są one również lepsze od dużych modułów krzemowych PV pod względem wpływu temperatury na wydajność ogniwa. Główną wadą modułu a-Si jest niska wydajność, która może być jednak zwiększona przy wykorzystaniu wielostykowych ogniw słonecznych.

Ogniwa amorficzne

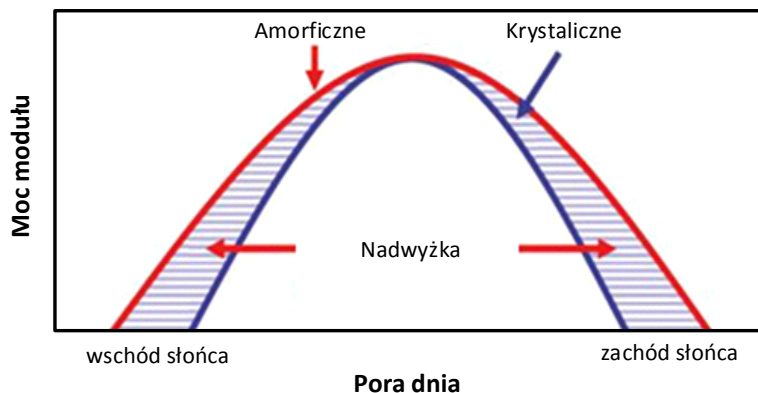
Moduły cienkowarstwowe na bazie krzemu są wykonane z krzemu amorficznego (a-Si). Krzem amorficzny może pochłaniać znacznie więcej światła niż krzem krystaliczny, wystarczy grubość warstwy około 1 μm . Jednak materiał ten generuje mniej nośników ładunku, więc sprawność komercyjnych modułów amorficznych sięga tylko 8–10%. Nie bez znaczenia jest fakt, że ogniwa amorficzne do uzyskania takiej samej mocy jak ogniwa krzemowe wymagają od 2- do 4-krotnie większej powierzchni [177].

Warto zwrócić uwagę na charakterystykę modułów amorficznych na tle modułów z krzemu krystalicznego. Ogniwa amorficzne są w stanie przetwarzać nawet niewielkie ilości światła na energię elektryczną, dzięki czemu pracują przy słabszym natężeniu promieniowania słonecznego. Są one również lepsze od dużych modułów krzemowych PV pod względem wpływu temperatury na wydajność ogniwa (ryc. 6.4).

W celu zwiększenia wydajności modułu a-Si dodaje się krzem mikrokryształiczny ($\mu\text{c-Si}$) oraz wykorzystuje się wielostykowe ogniwa słoneczne, tworząc w ten sposób ogniwo słoneczne mikromorficzne (tandemowe). Warstwa $\mu\text{c-Si}$ pochłania więcej światła w czerwonej i podczerwonej części widma. W przedziałach swojej nominalnej mocy technologie amorficzne charakteryzują się dobrymi sprawnościami w świetle dyfuzyjnym, produkując energię elektryczną również w wąskim spektrum promieniowania ultrafioletowego (UV) w pochmurne dni bez bezpośredniego promieniowania słonecznego.

Istnieją nawet amorficzne moduły działające w nocy, absorbujące odbite światło z powierzchni księżyca, stosowane w morskich bojach meteorologicznych i pomiarowych. Ze względu na swoją jednolitą budowę i fizyczną

odporność amorficzne moduły fotowoltaiczne stanowią trzon grupy mobilnych produktów solarnych. Wadą jest znacznie niższa trwałość tych modułów [204].



Ryc. 6.4. Różnica w charakterystyce modułów krzemowych amorficznych (a-Si) i krystalicznych (c-Si) [172]

Produkcja z wykorzystaniem krzemu amorficznego jest jedną z najtańszych technologii fotowoltaicznych. Moduły cienkowarstwowe mogą być produkowane w bardzo dużych rozmiarach, nawet do 5,7 m². Proces produkcyjny technologii amorficznej jest zbliżony do galwanicznego nakładania cienkiej warstwy na szybę lub inne podłoże. Zaletą modułów amorficznych jest to, że zarówno narzędzia produkcyjne, jak i techniki stosowane do składowania a-Si i materiałów pokrewnych są podobne do tych stosowanych w produkcji wyświetlaczy ciekłokrystalicznych.

Ze względu na swoją jednolitą budowę technologia amorficzna charakteryzuje się wysoką odpornością na wstrząsy i uderzenia, znajdując zastosowanie nie tylko w klasycznych modułach, ale przede wszystkim w modułach mobilnych, przenośnych i elastycznych.

CIGS

Warstwy miedzi, indu i selenu są aktywnym materiałem półprzewodnikowym w module CIS (miedź-ind-selen), a często dodaje się też gal do wytworzenia modułu CIGS (copper-indium-gallium-selenide). Jako środek pomocniczy i zwiększający wydajność może być również stosowana siarka. Moduły CIS i CIGS mają najwyższą wydajność spośród wszystkich modułów cienkowarstwowych: w warunkach laboratoryjnych wynosi ona 20%, zaś w modułach komercyjnych 7–12%.

Struktura krystaliczna związków chalkopirytowych odpowiada strukturze krzemu i ma elementy o różnych poziomach walencyjnych (miedź monowalentna, ind trójwartościowy i selen sześciowartościowy). Wyjątkową cechą tych półprzewodników jest ich wysoka tolerancja na defekty krystaliczne i zanieczyszczenia, ponieważ mogą one łączyć się w neutralne elektrycznie związki. W konsekwencji wymagania stawiane surowcom i procesom są niższe niż w przypadku innych materiałów półprzewodnikowych, co prowadzi do dużych oszczędności. Najnowsze badania wykazały, że zasadniczo możliwe jest zastąpienie szczególnie kosztownego pierwiastka, jakim jest cynk.

CdTe

Moduły fotowoltaiczne oparte na CdTe (tellurek kadmu) są uważane za technologię cienkowarstwową ze względu na bardzo cienkie warstwy aktywne, które mają grubość zaledwie kilku mikronów, co stanowi około jednej dziesiątej średnicy ludzkiego włosa. W technologii tej wykorzystuje się tlenkowe warstwy przewodzące (TCO), takie jak SnO_2 lub Cd_2SnO_4 , które są przezroczyste dla światła widzialnego i wysoce przewodzące dla efektywnego transportu elektronów. Warstwy pośrednie, takie jak CdS, pomagają zarówno we wzroście, jak i we właściwościach elektrycznych pomiędzy TCO a CdTe. Folia CdTe działa jako podstawowa warstwa fotokonwersyjna i absorbuje większość światła widzialnego w obrębie pierwszego mikrona materiału.

Wspólnie warstwy CdTe, pośrednie i TCO tworzą pole elektryczne, które zamienia światło pochłonięte w warstwie CdTe na energię elektryczną. Metal jest umieszczany na tylnej stronie, tworząc styki elektryczne. W produkcji wszystkie te warstwy są osadzane na szkle wejściowym i przetwarzane na kompletne panele słoneczne w ciągu zaledwie kilku godzin.

Jednym z wyzwań dla modułów CdTe jest toksyczność kadmu oraz ograniczona podaż telluru. Ogniwa zawierają szkodliwe materiały, co sprawia, że recykling tych produktów jest znacznie trudniejszy i kosztowny. Pomimo tych wyzwań technologia CdTe nadal rozwija się i stanowi konkurencyjną alternatywę dla innych technologii fotowoltaicznych.

Organiczne i barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne

Organiczne ogniwa słoneczne wykorzystują proces przypominający fotosyntezę, przekształcając energię promieniowania słonecznego na energię elektryczną. W tym mechanizmie silnie absorbujące chromofory, takie jak półprzewodnikowe cząsteczki organiczne lub polimery, działają jako nośniki, podczas gdy silne absorbery elektronów, np. fulereny, służą do generowania nośników

ładunku. Warstwa ogniwi organicznych ma zwykle grubość około 0,1 μm , aby efektywnie wchłonać światło.

Dotychczasowe ulepszenia skupiały się głównie na pakowaniu ogniwi, a nie na wydłużaniu trwałości materiałów fotoelektrycznych. Ogniwa organiczne mogą być produkowane na dużych, cienkich warstwach elastycznych folii za pomocą prostych metod druku lub powlekania, co przyspiesza proces produkcji i zmniejsza koszty. Jednak aby zwiększyć wydajność organicznych ogniwi słonecznych, konieczne będzie opracowanie nowych materiałów nośnikowych i absorpcyjnych.

Ogniwa fotowoltaiczne organiczne składają się ze związków organicznych, co oznacza, że zawierają węgiel. Wykorzystują one polimery oraz małe organiczne molekuly zdolne do absorpcji promieniowania słonecznego i przewodzenia energii elektrycznej. W swojej budowie i właściwościach fizykochemicznych przypominają powszechnie stosowane tworzywa sztuczne, co sprawia, że proces ich produkcji jest szybki i tani. Dodatkowo, dzięki inżynierii molekularnej, skład związków organicznych może być łatwo modyfikowany.

Jednakże obecnie produkowane ogniwa organiczne charakteryzują się niską sprawnością, małą stabilnością pracy i krótkim okresem żywotności. W związku z tym konieczne jest kontynuowanie badań nad rozwojem nowych materiałów oraz technologii produkcji, aby poprawić wydajność i trwałość organicznych ogniwi fotowoltaicznych [93].

Ogniwa barwnikowe, znane również jako *dye-sensitized solar cells* (DSSC), wykorzystują reakcję w środowisku wodnym pomiędzy barwnikiem światłoczułym, elektrolitami a półprzewodnikiem do generowania energii elektrycznej. Teoretycznie są bardzo ekonomiczne ze względu na niskie koszty materiałów, jednak sprawiały dotychczas trudności z uszczelnieniem modułów. Pomimo tego w laboratoriach osiągnięto wydajność nawet do 11%.

Perowskity to nieorganiczne związki chemiczne będące solą zawierającą kation aktywnego metalu, kation z bloku d oraz zazwyczaj anion tlenkowy. Choć nie są one powszechnie występującym materiałem, to w porównaniu do krzemu są kilkukrotnie tańsze. Daje to ogniwom opartym na perowskitach zdecydowaną przewagę ekonomiczną nad tradycyjnymi paliwami kopalnymi.

Ogniwa perowskitowe różnią się od tradycyjnych pod wieloma względami. Jedną z zalet jest możliwość produkcji tych ogniwi za pomocą bardzo prostych technologii, na przykład poprzez napyłanie bardzo cienkiej warstwy materiału na folię lub szkło. Dodatkowo perowskity mają znacznie większą efektywność niż tradycyjne materiały. Warstwa perowskitu o grubości 1 mikrometra jest

zdolna do absorpcji takiej samej ilości światła słonecznego co warstwa krzemu o grubości 180 mikrometrów.

Obecnie udało się osiągnąć wydajność perowskitowych ogniw słonecznych na poziomie 15%. Naukowcy są przekonani, że zwiększenie tej wydajności w warunkach laboratoryjnych do 20–25% nie będzie stanowiło problemu. Dodatkowo możliwość produkcji na dużą skalę przy użyciu prostych technologii minimalizuje straty wydajności.

Jednak obecność ołowiu w perowskitach budzi pewne obawy ze względu na potencjalne zagrożenia dla zdrowia i środowiska. Dlatego też dalsze badania i prace nad eliminacją lub ograniczeniem obecności ołowiu w perowskitach są niezbędne, aby umożliwić ich bezpieczne stosowanie w przemyśle fotowoltaicznym.

6.3.3. Ogniwa wielozłączone

Ogniwa wielozłączone, znane również jako *multijunction cells*, umożliwiają optymalne wykorzystanie widma słonecznego poprzez ułożenie warstw półprzewodników o różnych energiach pasmowych. Dzięki temu można osiągnąć wyższą sprawność konwersji energii słonecznej. Ogniwa te są zazwyczaj wykonane z materiałów półprzewodnikowych z trzeciej i piątej grupy układu okresowego.

Wykorzystanie wielu warstw o różnych szczelinach pasmowych umożliwia optymalne wykorzystanie energii światła słonecznego. Teoretyczne maksimum sprawności dla ogniw wielozłączowych wynosi około 42%, w porównaniu do 33% dla pojedynczych ogniw z jednym materiałem półprzewodnikowym.

Produkcja ogniw wielozłączowych jest zazwyczaj złożona i kosztowna, dlatego zwykle produkowane są tylko małe ogniwa do zastosowań w systemach koncentratorów. Ogniwa te są wykorzystywane w systemach koncentratorów, które wykorzystują soczewki optyczne do skupiania światła słonecznego na małych wielozłączowych ogniwach. Systemy koncentratorów często wykorzystują systemy śledzenia, które podążają za Słońcem w ciągu dnia w celu uzyskania optymalnej wydajności.

Ogniwa wielozłączone znajdują zastosowanie w technologii kosmicznej, bezzałogowych pojazdach latających oraz systemach fotowoltaicznych z koncentratorami. Ich wyższa cena w porównaniu do ogniw słonecznych z krystalicznego krzemu sprawia, że są one głównie wykorzystywane w tych zaawansowanych aplikacjach, gdzie wymagana jest wysoka sprawność i niezawodność.

Istnieją istotne wyzwania związane z wrażliwością na zmienność spektrum oraz mniejszym współczynnikiem wydajności, który jest wynikiem strat związanych z niezgodnością spektralną. Niemniej rozmiary tych strat można określić ilościowo, a także przewidzieć pewien margines sprawności przekształcania energii [207]. W przypadku idealnej konfiguracji – czyli doskonałego sprzężenia radiacyjnego oraz odzyskiwania promieniowania rekombinacyjnego z powodu strat wynikających ze niezgodności spektralnej – oczekiwana maksymalna średnia roczna sprawność może sięgać nawet 50% [15].

W celu redukcji kosztów i minimalizacji strat wynikających z niezgodności spektralnej ogniwa słoneczne wielojonowe III–V na krzemie są obiecującym rozwiązaniem [16]. Niemniej skomplikowane połączenia stanowią kolejną wadę w ogniwach słonecznych. Ogniwa słoneczne wielozłączone III–V są słabe w warunkach odwrotnego złącza, co wymaga zastosowania diody obejściowej dla ochrony każdego ogniwa słonecznego. To z kolei prowadzi do konieczności dodatkowych urządzeń ochronnych i bardziej skomplikowanych połączeń.

7. Baza danych i metoda pomiaru natężenia promieniowania

7.1. Przepływ światła słonecznego przez atmosferę

Moc promieniowania słonecznego maleje proporcjonalnie do kwadratu odległości od Słońca. Całkowita gęstość mocy promieniowania, czyli strumień padającego promieniowania na jednostkę powierzchni prostopadłą do jego kierunku, który dociera do powierzchni odbiornika pozaziemskiego (*AM 0*) i naziemnego (*AM 1,5*), określana jest jako natężenie promieniowania słonecznego [116].

Natężenie promieniowania słonecznego mierzy się w W/m^2 i oznacza symbolem G . Natężenie promieniowania słonecznego G_0 , dochodzącego do górnej granicy atmosfery, nazywane jest stałą słoneczną i wynosi $1367 \pm 2 \text{ W/m}^2$. Jej wartość jest korygowana i udostępniana przez Światowe Centrum Promieniowania (WRC – World Radiation Center) w Davos (Szwajcaria). W ciągu roku wartość ta zmienia się w granicach $\pm 3,4\%$, mieści się więc w zakresie od 1325 W/m^2 do 1420 W/m^2 . Tylko powierzchnia prostopadła do promieniowania słonecznego otrzymuje takie natężenie promieniowania. Poza atmosferą promieniowanie słoneczne składa się tylko z bezpośredniego składnika, nazywanego promieniowaniem bezpośrednim, normalnym lub wiązkowym G_b .

Jeśli Słońce jest ustawione prostopadle do powierzchni ziemi, światło musi przejść przez masę powietrza (*AM*) atmosfery tylko raz. W takim przypadku stan ten jest określany współczynnikiem masy powietrza *AM 1*. W przypadku

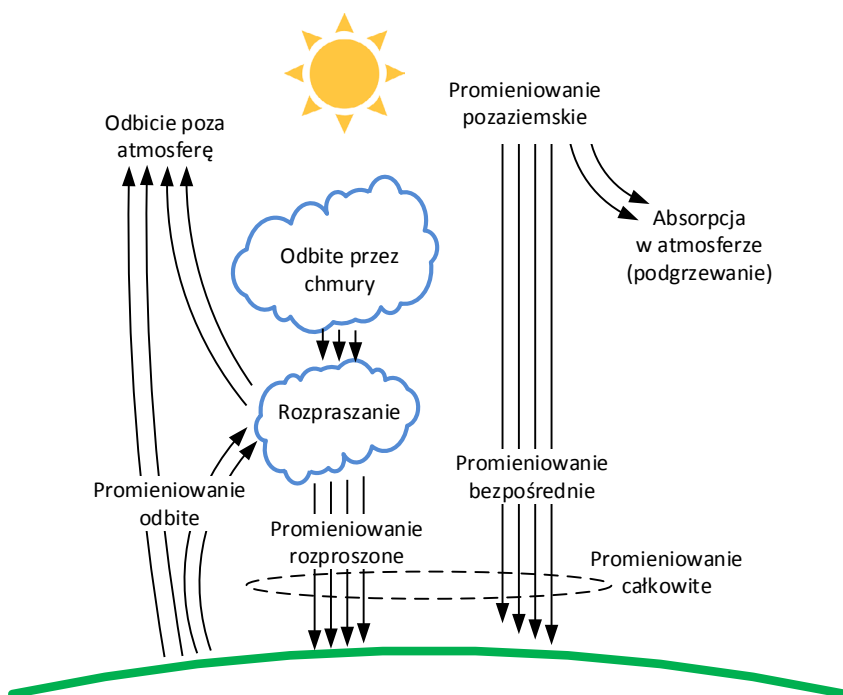
gdy $AM > 1$, droga promieniowania słonecznego przez atmosferę jest dłuższa. Długość tej drogi zależy od wysokości Słońca nad poziomem morza, która jest uzależniona od długości i szerokości geograficznej oraz daty. Wartość AM określa się jako tzw. atmosferyczną masę optyczną, która jest zdefiniowana wzorem:

$$AM = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{\sin\theta} \quad (7.1)$$

gdzie:

- AM – współczynnik masy powietrza,
- θ – kąt padania promienia słonecznego,
- p – lokalne ciśnienie atmosferyczne,
- $p_0 = 101\,300$ Pa [116].

Całkowita moc promieniowania padająca na jednostkę pola powierzchni poziomej składa się z sumy natężenia promieniowania bezpośredniego i rozproszonego. Tylko część promieniowania emitowanego przez promienie pozaziemskie dociera bezpośrednio do powierzchni Ziemi. Inne cząstki atmosferyczne odbijają lub rozpraszają światło słoneczne, jak pokazano na rycinie 7.1. Rozproszona część natężenia promieniowania nie ma określonego kierunku. Promieniowanie słoneczne przechodzi przez atmosferę i podlega różnym procesom absorpcji, rozpraszania lub pochłaniania, które powodują, że na powierzchni Ziemi odbierane są niższe poziomy promieniowania słonecznego. Te procesy wynikają z obecności składników atmosfery, takich jak ozon lub dwutlenek węgla, oraz cząstek stałych i ciekłych w zawiesinie, takich jak aerozole lub para wodna. Jednak głównym źródłem tłumienia jest pokrywa chmur. Zarówno wartość szerokopasmowa, jak i procesy absorpcji oraz tłumienia mają różny wpływ na długości fal promieniowania słonecznego, więc rozkład widmowy promieniowania słonecznego na poziomie gruntu różni się od tego poza atmosferą.

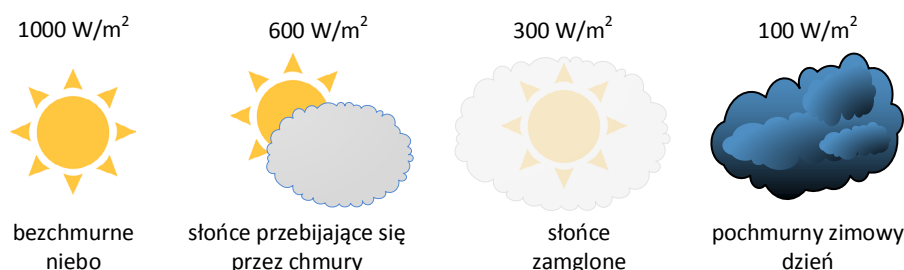


Ryc. 7.1. Schemat przepływu światła słonecznego przez atmosferę

Promieniowanie słoneczne odbierane na poziomie gruntu, znane jako całkowite natężenie promieniowania G , wyrażane w W/m^2 , jest sumą trzech składników. Pierwszy z nich, G_b , nazywany promieniowaniem bezpośrednim lub wiązkowym, to ta część promieniowania słonecznego, która dociera do ziemi bez tłumienia przez atmosferę i może być modelowana jako pochodząca bezpośrednio z tarczy słonecznej. Druga część, G_d , czyli rozproszona (dyfuzyjna), to promieniowanie słoneczne docierające do ziemi po odbiciu lub rozproszeniu przez atmosferę i uznawane za pochodzące z całej kopuły nieba. Promieniowanie bezpośrednie zależy od stopnia zacienienia, podczas gdy rozproszone – od przejrzystości nieboskłonu. Komponent bezpośredni jest dostępny tylko wówczas, gdy tarcza słoneczna nie jest zasłonięta przez chmury, natomiast komponent rozproszony jest zawsze dostępny, będąc jedynym promieniowaniem, gdy chmury blokują tarczę słoneczną. Jedynie bezpośrednie natężenie promieniowania może być wykorzystywane przez systemy koncentracyjne, ale systemy nieskoncentrowane mogą również korzystać z promieniowania rozproszonego. Promieniowanie słoneczne w warunkach bezchmurnego nieba oraz czystej i suchej atmosfery jest bardzo istotnym parametrem,

ponieważ dostarcza informacji o maksymalnej wartości promieniowania słonecznego dostępnego w danym miejscu. Zwykle ta wartość jest modelowana i używana jako dane wejściowe dla innych modeli stosowanych do szacowania promieniowania słonecznego w normalnych warunkach atmosferycznych.

Trzecia część, która często nie jest uwzględniana, to promieniowanie odbite od powierzchni ziemi lub pobliskich przeszkód. Średnie odbicie od ziemi wynosi około 20% globalnego natężenia promieniowania. Stąd na nachylonej płaszczyźnie na powierzchni ziemi energia słoneczna padająca jest sumą natężenia promieniowania bezpośredniego, rozproszonego i odbitego [174]. Powierzchnia prostopadła do napływającego bezpośredniego światła słonecznego zazwyczaj osiąga najwyższe możliwe natężenie promieniowania. Zazwyczaj jest ono niższe niż 1000 W/m^2 ; wyższe wartości są możliwe tylko w szczególnych sytuacjach, np. gdy śnieg lub chmury odbijają światło słoneczne na powierzchni odbiornika. W literaturze można znaleźć różne wartości natężenia promieniowania słonecznego w zależności od stopnia zachmurzenia. Na rycinie 7.2 przedstawione są najczęściej podawane wartości.



Ryc. 7.2. Całkowite natężenie promieniowania słonecznego w zależności od zachmurzenia

Promieniowanie bezpośrednie pochodzi bezpośrednio z tarczy słonecznej, więc wartość na nachylonej powierzchni może być łatwo obliczona z wartości na płaszczyźnie poziomej, znając tylko położenie Słońca na niebie oraz nachylenie i orientację nachylonej powierzchni. W przeciwieństwie do tego oszacowanie składowej rozproszonej na nachylonej powierzchni nie jest tak proste, ponieważ została ona rozproszona przez składniki atmosfery lub odbita od powierzchni gruntu, co w rezultacie może być opisane jako pochodzące z całej kopuły nieba. Promieniowanie rozproszone może być szacowane przy użyciu dwóch modeli: izotropowego i anizotropowego. Porównanie tych modeli można znaleźć w [98]. W modelu izotropowym promieniowanie rozproszone jest równomiernie rozłożone na całej kopule nieba, podobnie jak w warunkach całkowitego zachmurzenia, kiedy gruba warstwa chmur uniemożliwia

ustalenie położenia tarczy słonecznej. Przy takim założeniu promieniowanie rozproszone na nachylonej powierzchni jest wartością na płaszczyźnie poziomej, skalowaną współczynnikiem zależnym tylko od nachylenia powierzchni i odpowiadającą tej części kopuły nieba, która jest widoczna z powierzchni płaszczyzny. Jednak promieniowanie rozproszone prawie nigdy nie jest jednorodne (izotropowe), ze względu na zmieniające się pokrycie chmur, które powoduje różnice w jasności różnych obszarów nieba. Nawet w warunkach bezchmurnych łatwo dostrzec regiony o różnej jasności. Oprócz izotropowego tła widoczny jest jasny obszar wokół Słońca, a w zależności od stopnia zachmurzenia mogą wystąpić jasne obszary wokół zenitu lub horyzontu. Sposób, w jaki te obszary są szacowane i uwzględniane, różni się w zależności od modelu anizotropowego. Mogą być one podzielone na dwie grupy, w zależności od tego, ile obszarów jest obok tła izotropowego oraz czy uwzględniają one pasmo okołobiegunowe i/lub horyzontalne.

Usłonecznienie N , czyli liczba godzin z bezpośrednią widocznością Słońca w ciągu roku na danym obszarze, określa czas, w którym promienie padają bezpośrednio na powierzchnię Ziemi. Do pomiaru usłonecznienia służy urządzenie zwane heliografem. Parametr ten jest wykorzystywany w energetyce słonecznej do szacowania warunków pracy instalacji. Po zintegrowaniu natężenia promieniowania słonecznego w określonym czasie staje się ono sumą natężenia promieniowania słonecznego na powierzchni poziomej, tzw. napromienianiem, mierzonego w J/m^2 lub Wh/m^2 i reprezentowanego przez symbol H . Napromienianie całkowite to suma napromieniania słonecznego (bezpośredniego i rozproszonego). Poza atmosferą napromienianie wynosi około 12 tys. kWh/m^2 (8760 h przy 1367 W/m^2). W każdym miejscu na Ziemi połowa roku jest nocą, bez Słońca. Atmosfera redukuje napromienianie o co najmniej 25%. Chmury i kurz powodują dalsze zmniejszenie. Najlepsze miejsca na Ziemi, na skrajnych obszarach pustynnych, otrzymują roczne napromienianie przekraczające 2500 kWh/m^2 . Z drugiej strony istnieją pochmurne miejsca na dużych szerokościach geograficznych, gdzie roczne napromienianie jest znacznie niższe niż 1000 kWh/m^2 . W Polsce suma całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromienianie) wynosi średnio 990 kWh/m^2 . Uśredniona wartość napromieniania w ciągu roku wynosi od 950 kWh/m^2 (południowo-zachodnia część Polski – obszar Sudetów) do 1081 kWh/m^2 (wschodnia część Polski). Promieniowanie rozproszone na obszarze Polski wynosi średnio 50%, w czerwcu 44%, a w grudniu 72% [169].

7.2. Wybór bazy danych

7.2.1. Metody tworzenia baz danych

W literaturze występują 3 rodzaje metod tworzenia baz danych o natężeniu promieniowania słonecznego:

1. Wyznaczanie „typowych lat meteorologicznych” na podstawie danych pomiarowych ze stacji meteorologicznych i szacowania promieniowania.
2. Integracja wyników pomiarów promieniowania słonecznego na poziomie gruntu z danymi obliczonymi na podstawie zdjęć z satelitów geostacjonarnych.
3. Reanaliza danych pogodowych.

W drugiej i trzeciej metodzie również opracowuje się „typowe lata meteorologiczne” na podstawie uzyskanych danych. Nie ma wątpliwości, że najlepszym sposobem pomiaru promieniowania słonecznego jest zastosowanie wysokiej jakości czujników na ziemi. Aby jednak pomiary te były użyteczne, powinny spełniać szereg warunków:

- powinny być stosowane tylko wysokiej jakości czujniki pomiarowe,
- pomiary powinny być wykonywane co najmniej co godzinę,
- czujniki powinny być regularnie kalibrowane i czyszczone,
- dane powinny być zbierane przez długi okres, najlepiej 10 lat lub więcej.

Liczba naziemnych pomiarów promieniowania, które spełniają wszystkie te kryteria, jest stosunkowo niewielka, a stacje są często rozmieszczone w dużych odległościach. Z tych powodów coraz powszechniejsze staje się wykorzystywanie danych satelitarnych do szacowania promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi. W większości tych metod wykorzystuje się dane z geostacjonarnych satelitów meteorologicznych. Zalety wykorzystania takich danych są następujące:

- dane dotyczące promieniowania słonecznego są dostępne na całym obszarze objętym obrazem satelitarnym, na przykład satelity METEOSAT obejmują Afrykę, Europę i większość Azji do około 60°N, przy rozdzielczości obrazu wynoszącej kilka kilometrów.
- zazwyczaj dostępne są długie serie czasowe – do 30 lat lub więcej.

Wadą korzystania z danych satelitarnych jest to, że promieniowanie słoneczne na poziomie gruntu musi być obliczane za pomocą szeregu dość

skomplikowanych algorytmów matematycznych, które wykorzystują nie tylko dane satelitarne, ale także dotyczące pary wodnej w atmosferze, aerozoli (pyłów, cząstek) i ozonu. Niektóre warunki mogą na przykład spowodować, że obliczenia stracą na dokładności:

- śnieg, który może być pomyłony z chmurami,
- burze pyłowe, które mogą być trudne do wykrycia na zdjęciach satelitarnych.

Satelity geostacjonarne również mają ograniczenia, ponieważ nie obejmują obszarów polarnych. Innym źródłem danych szacunkowych dotyczących promieniowania słonecznego są dane z analizy klimatu. Dane z reanalizy są obliczane przy użyciu numerycznych modeli prognoz pogody, ponownie uruchamiając modele z przeszłości i wprowadzając poprawki przy użyciu znanych pomiarów meteorologicznych. Rezultatem zastosowania modeli jest duża liczba wielkości meteorologicznych, często uwzględniających promieniowanie słoneczne na poziomie gruntu. Należą do nich ECMWF ERA-5, opracowany przez Europejskie Centrum Prognoz Pogody Średniego Zasięgu (ECMWF), oraz COSMO-REA obejmujący Europę i Afrykę Północną [29]. Niektóre z tych zbiorów danych mają zasięg globalny, w tym z obszarami polarnymi, gdzie metody satelitarne nie mają danych. Wadą tych zbiorów danych jest przeważnie niska rozdzielczość przestrzenna (jedna wartość co 30 km lub więcej), a dokładność wartości promieniowania słonecznego na ogół nie jest tak dobra jak w przypadku danych satelitarnych dotyczących promieniowania słonecznego na obszarach objętych obu rodzajami zbiorów danych.

Lokalne mapy lub atlasy natężenia napromienienia zawierają informacje na temat rocznej lub miesięcznej sumy natężenia promieniowania. W wielu przypadkach lokalne służby meteorologiczne mogą dostarczyć bardzo szczegółowych danych. Jednak dane te rzadko są dostępne bezpłatnie. Oprogramowanie Meteonorm zawiera największą dostępną komercyjnie bazę danych dotyczących promieniowania słonecznego, obejmującą kilka tysięcy miejsc na całym świecie. Niektóre internetowe bazy danych oferują bezpłatne dane dotyczące napromieniania, podczas gdy amerykańskie Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej dostarcza 239 bezpłatnych zestawów danych godzinowych z USA. Światowe Centrum Danych o Napromienianiu oraz strona internetowa NASA zawierająca zasoby meteorologii powierzchniowej oferują dodatkowe globalne dane dotyczące napromieniania. Wreszcie europejskie projekty S@tel-light i SoDa dostarczają wyczerpujących danych dla Europy. Interaktywny System Geograficznej Informacji Fotowoltaicznej (Photovoltaic Geographical Information System – PVGIS) zawiera wartości

natężenia promieniowania słonecznego docierającego do płaszczyzny poziomej, pochylonej pod optymalnym lub innym kątem, a także wartości optymalne kąta nachylenia w każdej szerokości geograficznej Europy, Afryki, Ameryki i Azji [112]. PVGIS jest bezpłatnym kalkulatorem energii słonecznej wdrożonym przez JRC (Joint Research Center) z poziomu wewnętrznych jednostek naukowych Komisji Europejskiej.

Wyniki badań i analiz, które oferują dostępne na rynku oprogramowania rządowe i komercyjne, nie uwzględniają poruszania się pojazdu i efektu zacieniania. Istotne jest określenie źródła najbardziej zbliżonych danych dotyczących sumy całkowitego natężenia promieniowania słonecznego, zwanej krócej „napromienianiem”, które mogą być używane podczas analizy poruszającego się pojazdu miejskiego.

7.2.2. Typowe lata meteorologiczne wg ISO

Przeanalizowano wyniki napromieniania w ujęciu krajowym, wykorzystując dane o napromienianiu w poszczególnych miastach Polski przedstawione jako typowe lata meteorologiczne ISO. W analizie zwrócono szczególną uwagę na składnik napromieniania całkowitego, jakim jest napromienianie rozproszone niezwiązane z zacienieniem, które może być w pełni wykorzystane przez pojazd miejski.

Dzięki danym dotyczącym sumy natężenia promieniowania słonecznego (napromienianie), które opisują dostępność energii dla systemów słonecznych, możliwe jest planowanie i prognozowanie wydajności energetycznej systemów słonecznych. Wahania rocznego napromieniania z roku na rok mogą wynosić znacznie powyżej 20%, okres pomiaru powinien obejmować co najmniej 7–10 lat. Przeprowadzenie kampanii pomiarowej w tak długim okresie jest mało prawdopodobne przed planowaniem i instalacją systemu słonecznego, dlatego też dane dotyczące napromieniania można pobrać z istniejących baz danych. Opracowuje się typowe lata meteorologiczne dla danej lokalizacji, które są zbiorem godzinowych parametrów meteorologicznych dla całego roku kalendarzowego reprezentatywnych dla klimatu danej miejscowości. Oprócz parametrów natężenia promieniowania słonecznego zawiera również pozostałe statystyczne parametry meteorologiczne, takie jak zachmurzenie, prędkość i kierunek wiatru, wielkość opadu, temperaturę, wilgotność i ciśnienie. Opracowano następujące rodzaje typowych lat meteorologicznych:

- ISO – typowy rok meteorologiczny wg EN ISO 15974-4-ISO,
- TMY2 – typowy rok meteorologiczny dla obliczeń energetycznych,

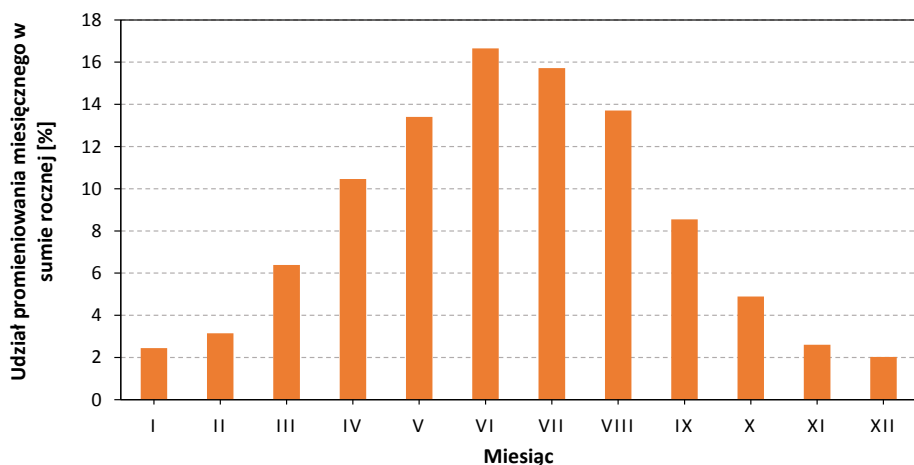
- TRY – rok odniesienia ASHARE,
- WYEC2 – meteorologiczny rok odniesienia dla obliczeń energetycznych.

W Polsce dane wartości natężenia promieniowania całkowitego na powierzchni poziomą można odczytać z wyznaczonych z baz danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej typowych lat meteorologicznych według ISO dla danej lokalizacji. Dane te zostały udostępnione przez Ministerstwo Infrastruktury. Zbiór złożony z 8760 rekordów opracowano wg PN-EN ISO 15927-4:2007 dla 61 lokalizacji w Polsce mających co najmniej 3-godzinowe ciągi danych terminowych z okresu trzydziestu lat, począwszy od roku 1971, a skończywszy na roku 2000. Roczny ciąg danych pogodowych wg ISO utworzono z 12 miesięcy wybranych z okresu 30 lat obserwacji meteorologicznych. Wybór danego miesiąca przeprowadza się poprzez wyznaczenie z okresu 30 lat trzech miesięcy, dla których suma statystyk Finkelsteina–Schafera dla temperatury termometru suchego, wilgotności względnej oraz całkowitego natężenia promieniowania słonecznego jest najmniejsza. Następnie spośród wyselekcjonowanych trzech miesięcy wybiera się ten, dla którego odchylenie średniej prędkości wiatru od miesięcznej średniej wieloletniej jest najmniejsze [32]. Ponad 43 stacje dostarczają pełne ciągi danych od 30 lat, z kolei dla pozostałych 19 stacji meteorologicznych długości ciągów danych źródłowych wynoszą od 11 do 29 lat. Stacje meteorologiczne, dla których wyznaczono rok meteorologiczny z wykorzystaniem niepełnych 30-letnich ciągów pomiarowych, w danych źródłowych oznaczono specjalnym znakiem. Dane przedstawiono w postaci plików tekstowych zawierających 262 800 linii (30 lat po 8760 godzin) [199].

Typowy rok meteorologiczny dla obliczeń energetycznych TMY2 (Typical Meteorological Year, Version 2) opracowano w National Renewable Energy Laboratory. Jest on wykorzystywany w oprogramowaniu PVGIS udostępnionym przez Unię Europejską. Dodatkowo wyniki pomiarów na poziomie gruntu są integrowane z danymi obliczonymi na podstawie zdjęć z satelitów geostacjonarnych. Również tak jak rok wg ISO wykorzystuje minimum 10-letni zbiór danych pomiarowych. Poszczególne miesiące wybierane są poprzez statystyczną analizę porównawczą pojedynczego miesiąca z wartościami wieloletnimi. Obliczany jest złożony indeks porównawczy dla danych miesięcy jako funkcja wagowa ze średnich dziennych pomiarów wartości sumy całkowitego i bezpośredniego natężenia promieniowania słonecznego oraz wartości średniej, minimalnej i maksymalnej termometru suchego, prędkości wiatru i temperatury punktu rosy.

TRY (Typical Reference Year) został zaproponowany w 1970 roku przez Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji (ASHARE). Z kilkudziesięciu lat obserwacji wybiera się jeden rzeczywisty rok pomiarowy, eliminując lata z ekstremalnymi temperaturami. Metoda bazująca na wyborze roku najłagodniejszego i z jak najmniejszą liczbą ekstremalnych średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza pozwala na proste i szybkie obliczenia.

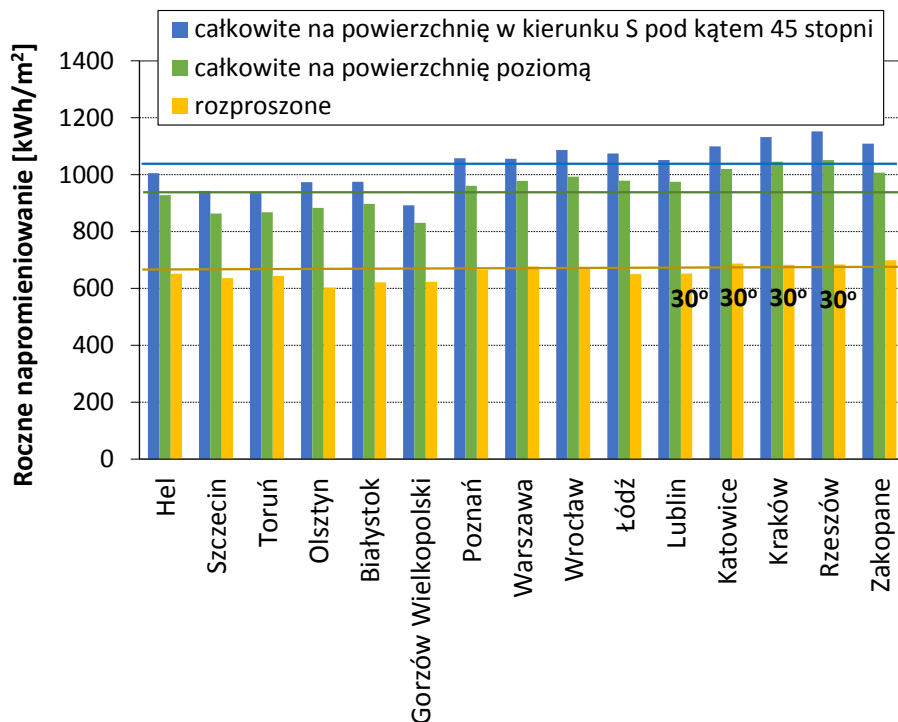
WYEC2 (Weather Year for Energy Calculations, Version 2) opracowało Watsun Simulation Laboratory dla ASHARE. Podobnie jak TMY2 poszczególny miesiąc do roku meteorologicznego wybiera się na podstawie analizy statystycznej, obliczając złożony indeks porównawczy spośród poszczególnych danych meteorologicznych zebranych w tym przypadku z minimum 30 lat obserwacji meteorologicznych dla danej lokalizacji.



Ryc. 7.3. Procentowy udział średniej sumy miesięcznego natężenia promieniowania słonecznego w średniej sumie rocznej na podstawie typowych lat meteorologicznych ISO 1971–2001

Na podstawie typowych lat meteorologicznych ISO 1971–2001 można podać średnie udziały procentowe sum miesięcznych natężenia promieniowania słonecznego w sumie rocznej (ryc. 7.3). W okresie wiosenno-letnim (kwiecień–lipiec) na powierzchnię Polski dociera ponad 56% rocznego promieniowania słonecznego, a tylko w czerwcu ponad 16%. Grudzień i styczeń to miesiące z najmniejszą wartością promieniowania słonecznego (sumarycznie poniżej 5%). Zróżnicowanie to wynika z faktu, iż po pierwsze w miesiącach zimowych Słońce jest nisko nad horyzontem, co niekorzystnie wpływa na

pochłanianie promieniowania bezpośredniego, a po drugie występuje krótki czas oświetlania powierzchni przez Słońce, tzw. usłonecznienie.



Ryc. 7.4. Średnia suma roczna natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) dla głównych miast w Polsce na podstawie typowych lat meteorologicznych ISO

W Polsce panuje klimat umiarkowany i roczna suma godzin słonecznych (usłonecznienie) jest zawarta w granicach od 1300 do 1900 godzin. Średnie roczne usłonecznienie wynosi 1600 godzin, co stanowi około 18,2% okresu całego roku, kiedy możliwe jest wykorzystanie promieniowania słonecznego do celów energetyki słonecznej. Warto jednak zauważyć, że 75% z tego czasu przypada w półroczu letnim, od kwietnia do końca września, średnio 1200 godzin. W półroczu zimowym, od października do marca, wartość usłonecznienia jest trzykrotnie mniejsza i wynosi średnio 400 godzin [169].

Tab. 7.1. Średnia suma roczna natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) dla głównych miast w Polsce na podstawie typowych lat meteorologicznych wg ISO: na powierzchnię poziomą całkowite (H), bezpośrednie (H_b), rozproszone (H_d) oraz pod kątem (H_β)

	Średnia suma roczna natężenia promieniowania słonecznego (kWh/m ²)					
	na powierzchnię poziomą				w kierunku S pod kątem	
	H	H_d	H_b	udział H_d [%]	H_β	kąt nachylenia
Hel	928	277	652	70	1005	45
Szczecin	863	227	636	74	943	45
Toruń	868	224	644	74	935	45
Olsztyn	883	281	603	68	974	45
Białystok	897	275	622	69	975	45
Gorzów W.	830	207	623	75	892	45
Poznań	961	296	665	69	1057	45
Warszawa	978	301	677	69	1055	45
Wrocław	993	324	669	67	1086	45
Łódź	978	328	650	66	1074	45
Lublin	975	323	652	67	1051	30
Katowice	1020	332	688	67	1099	30
Kraków	1046	363	683	65	1132	30
Rzeszów	1051	367	684	65	1152	30
Zakopane	1007	307	699	69	1109	45
Polska	952	295	656	69	1036	41

Na rycinie 7.4 i w tabeli 7.1 przedstawiono sumę roczną całkowitego H , bezpośredniego H_b i rozproszonego H_d natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię poziomą oraz nachyloną H_β pod kątem 45° bądź 30° w kierunku południowym dla poszczególnych stacji badawczych na terenie Polski z pełnymi danymi pomiarowymi. Wybrano wartość oraz kierunek nachylenia oświetlanej powierzchni, do której dochodzi w analizowanych miastach najwięcej światła słonecznego w porównaniu do innych kątów i kierunków pochylenia. We wszystkich miastach w Polsce kierunek jest południowy, a dla większości nachylenie 45°. Jedynie Lublin, Katowice i Kraków otrzymują najwięcej energii słonecznej dla kąta 30° i dla tych miast zostało to zaznaczone na wykresie. Dane pochodzą z uśrednionych danych z poszczególnych miesięcy dla typowych lat meteorologicznych wg ISO uzyskanych z baz danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w latach 1971–2000 [32]. Do analizy wybrano w większości stacje badawcze miast wojewódzkich, uzupełniając wykres o dane z południowego krańca Polski (Zakopane). Ze względu

na brak danych z okresu minimum 30-letniego do utworzenia roku meteorologicznego dla stacji w Gdańsku i Bydgoszczy wybrano najbliższe znajdujące się stacje – odpowiednio Hel i Toruń. Na wykresie liniami wyznaczono wartości średnie rocznego napromieniowania dla Polski spośród analizowanych lokalizacji. Optymalnie oświetlana powierzchnia umieszczona w kierunku południowym pod kątem głównie 45° średniorocznie otrzymuje energię słoneczną na jednostkę powierzchni o wartości 1036 kWh/m^2 . W przypadku horyzontalnego położenia jest to wartość o 8% mniejsza i wynosząca 952 kWh/m^2 . Napromieniowanie rozproszone stanowi średnio 69% napromieniowania całkowitego docierającego do poziomej powierzchni i wynosi 656 kWh/m^2 . Promieniowanie bezpośrednie jest dostępne tylko wtedy, gdy tarcza słoneczna nie jest zablokowana przez chmury, natomiast promieniowanie rozproszone jest zawsze dostępne, będąc jedynym promieniowaniem, gdy chmury blokują tarczę słoneczną.

Najwięcej energii słonecznej dociera do horyzontalnej i optymalnie ustawionej powierzchni w Rzeszowie (1051 kWh/m^2), a najmniej w Gorzowie Wielkopolskim (830 kWh/m^2). Największy udział napromieniowania rozproszonego w napromieniowaniu całkowitym na powierzchnię poziomą jest w Gorzowie Wielkopolskim (75%), Toruniu (74,2%) i Szczecinie (73,7%). Są to jednocześnie miasta z dość niską wartością napromieniowania. Najmniejszy udział napromieniowania rozproszonego występuje w miastach dobrze nasłonecznionych, takich jak Rzeszów i Kraków, gdzie 35% napromieniowania to napromieniowanie bezpośrednie z widoczną tarczą Słońca. Roczne napromieniowanie rozproszone w skali Polski wg ISO to średnio 69% i wynosi 656 kWh/m^2 . Może ono zostać w całości wykorzystane na powierzchni dachu autobusu.

7.2.3. Fotowoltaiczny system informacji geograficznej PVGIS

Aplikacja PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) zawiera bazy danych rocznej sumy natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania). Aplikacja korzysta z baz danych Europejskiego Instytutu Energii i Transportu (IET – Institute for Energy and Transport), którego założycielem jest Komisja Europejska. Baza EC IET zawiera dane, które są wynikiem przetwarzania danych źródłowych zmierzonego natężenia promieniowania słonecznego przez systemy SoDa (Solar Radiation Data) i danych linii horyzontu oraz z użyciem własnej metodologii do obliczania promieniowania słonecznego z satelity [148], [147], [98].

System SoDa przetwarza dane o natężeniu promieniowania słonecznego dostarczane przez kraje z terenu Unii Europejskiej i spoza niej. Z kolei system

trójwymiarowego skanowania powierzchni Ziemi za pomocą satelitów geologicznych, działający w ramach Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) i należący do United States Geological Survey (USGS), wykorzystywany jest do określania linii horyzontu dla wybranego analizowanego obszaru. Wysokość terenu jest określana z rozdzielczością 90 metrów. Powstała linia horyzontu nie uwzględnia wpływu cieni z pobliskich obiektów, takich jak domy lub drzewa, a jedynie wzniesienia i inne większe elementy krajobrazu. Użytkownik aplikacji PVGIS ma opcję pozwalającą na przesłanie pliku z danymi o wysokości horyzontu do zastosowania, zamiast wbudowanej informacji o horyzoncie.

W obecnej wersji PVGIS wykorzystuje dane satelitarne do szacowania promieniowania słonecznego z satelitów METEOSAT obejmujących Europę, Afrykę i większość Azji. W zależności od rodzaju satelity zdjęcia są rejestrowane co 15 lub 30 minut. PVGIS wykorzystuje jedno zdjęcie na godzinę. Rozdzielczość obrazów satelitarnych jest zróżnicowana, najwyższa jest tuż pod satelitą (około 4 km) i zmniejsza się podczas ruchu w kierunku krawędzi obrazu.

Baza danych PVGIS-SARAH ma rozdzielczość 5 km i korzysta z obrazów dwóch satelitów geostacjonarnych METEOSAT (0° i 57°E) obejmujących Europę, Afrykę i Azję. Wartości godzinowe są obliczane bezpośrednio z jednego pojedynczego obrazu satelitarnego.

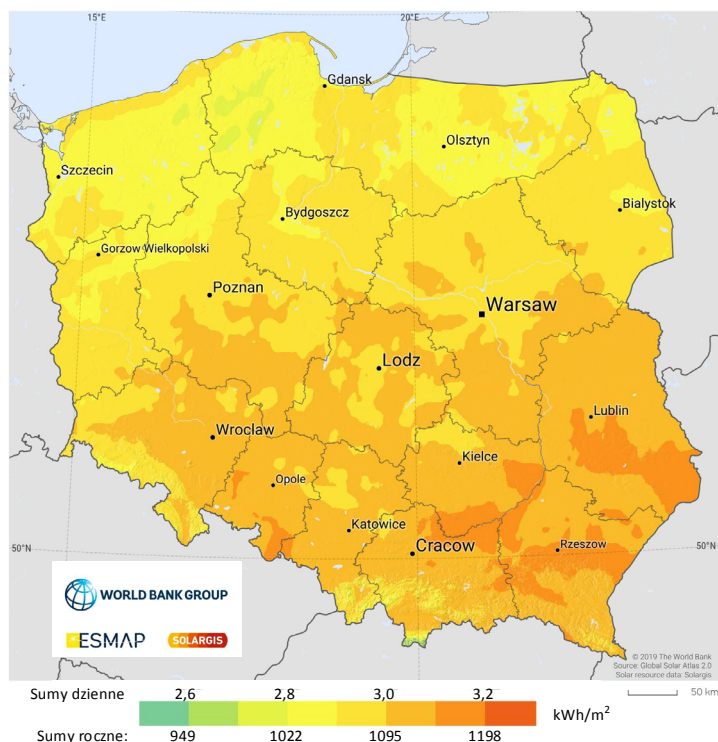
Pierwszym krokiem w obliczeniach jest wykorzystanie zdjęć satelitarnych do oszacowania wpływu chmur na promieniowanie słoneczne. Chmury mają tendencję do odbijania padającego światła słonecznego, dzięki czemu do ziemi dociera mniej promieniowania.

Współczynnik odbicia chmur jest obliczany na podstawie tego samego piksela obrazu satelitarnego o tej samej porze każdego dnia w miesiącu. Metoda ta zakłada wtedy, że najciemniejszy piksel w miesiącu to ten, który odpowiada czystemu niebu (bez chmur). Dla wszystkich pozostałych dni współczynnik odbicia chmur, tzw. albedo, jest następnie obliczany relatywnie do dnia bezchmurnego. Jest to robione dla wszystkich godzin w ciągu dnia. W ten sposób można obliczyć efektywne albedo chmury.

W drugim kroku metoda oblicza natężenie promieniowania słonecznego w warunkach czystego nieba (tj. bez chmur), wykorzystując teorię przenikania promieniowania w atmosferze wraz z danymi dotyczącymi ilości aerozoli (pyłów, cząstek itp.) znajdujących się w atmosferze oraz stężenia pary wodnej i ozonu, które mają tendencję do pochłaniania promieniowania na poszczególnych długościach fal. Następnie oblicza się całkowite natężenie promieniowania z uwzględnieniem albedo chmury i warunków czystego nieba.

Metodologia może zawieść, jeśli na ziemi jest śnieg, który może być postrzegany jako chmura, co prowadzi do zbyt niskiego obliczenia natężenia promieniowania. Ponadto informacje dotyczące aerozoli wykorzystywane do obliczeń składają się ze średnich z wielu lat, więc krótkotrwałe zmiany aerozoli, na przykład spowodowane burzami pyłowymi lub wybuchami wulkanów, nie są tak dobrze uchwycone przez tę metodę.

Dane natężenia promieniowania słonecznego otrzymane na podstawie zdjęć satelitarnych są porównywane z pomiarami na poziomie gruntu, aby uzyskać wyobrażenie o tym, jak duża jest niepewność w danych dotyczących promieniowania słonecznego pochodzących z satelity. Większość pomiarów ze stacji naziemnych pochodzi z Bazowej Sieci Promieniowania Powierzchniowego (BSRN – Baseline Surface Radiation Network), która zapewnia wysokiej jakości pomiary promieniowania słonecznego dla stacji na całym świecie. Przykładowa mapa została przedstawiona na rycinie 7.5.

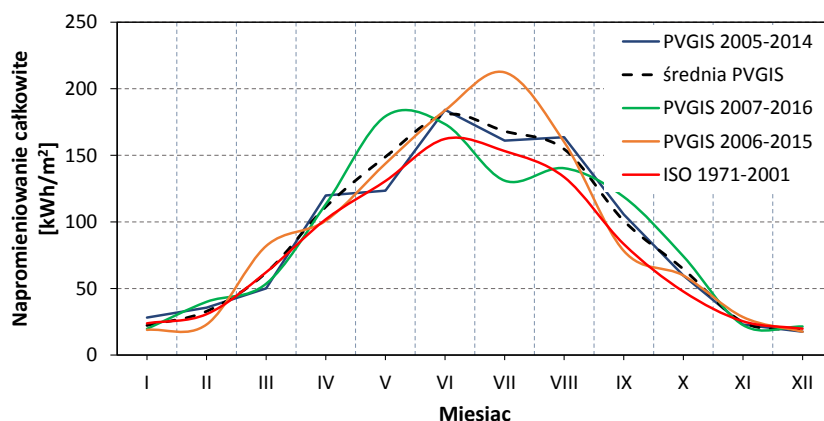


Ryc. 7.5. Długoterminowa, średnia wartość sumy dziennej i rocznej natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) dla obszaru Polski za okres 1994–2018. Na podstawie © 2019 The World Bank, Global Solar Atlas 2.0, dane zasobów energii słonecznej: Solargis

W pracach [148], [147], [98], [110] przedstawiono wyniki walidacji danych dotyczących promieniowania słonecznego z satelitów wykorzystywanych w PVGIS poprzez porównanie ich z pomiarami ze stacji naziemnych. Procentowe różnice pomiędzy stacją meteorologiczną a danymi uzyskanymi z danych satelitarnych w przypadku PVGIS-Sarah są w zakresie -3,2–5,5%. Analiza porównawcza napromieniowania przy użyciu aplikacji PVGIS oraz danych pomiarowych ze stacji meteorologicznych zlokalizowanych w Polsce potwierdzają różnice uzyskanych danych. W pasie nadmorskim różnice średnio wynoszą 28% [34].

7.2.4. Porównanie danych ISO o PVGIS

Wykonano analizę porównawczą danych sumy natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) uzyskanych przy pomocy pomiarów ze stacji meteorologicznej przeanalizowanych metodą ISO oraz przy pomocy zdjęć satelitarnych PVGIS. Pierwsze z nich są wykorzystywane do obliczeń energetycznych budynków. Drugie z kolei służą do analizy możliwości wykorzystania solarnych systemów energetycznych. Pierwsze ograniczone są ilością dostępnych stacji meteorologicznych w Polsce (43 sztuki) i przy analizie wykorzystuje się dane z najbliższej stacji. Dodatkowo model ISO nie uwzględnia odbijania i rozpraszania promieniowania słonecznego przez grunt i otoczenie budynku oraz przyjmuje, że promieniowanie rozproszone dociera do każdej płaszczyzny z całej półsfery (model izotropowy).



Ryc. 7.6. Średnia suma miesięczna całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną wyznaczone jako typowy rok meteorologiczny metodą PVGIS oraz ISO dla stacji meteorologicznej Radawiec k. Lublina

Tab. 7.2. Średnia suma miesięczna i roczna całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną wyznaczone jako typowy rok meteorologiczny metodą PVGIS oraz ISO dla stacji meteorologicznej Radawiec k. Lublina

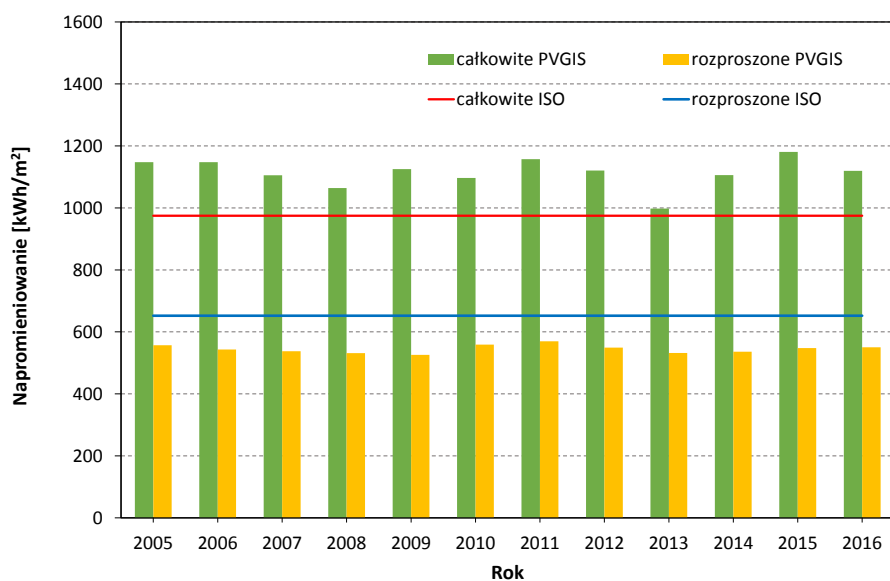
Miesiąc	Suma natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) [kWh/m ²]				
	PVGIS 2007–2016	PVGIS 2006–2015	PVGIS 2005–2014	średnia PVGIS	ISO 1971–2001
I	20	19	28	22	24
II	40	23	36	33	31
III	54	82	50	62	62
IV	113	101	120	111	102
V	179	144	123	149	131
VI	173	184	184	180	162
VII	131	212	161	168	153
VIII	140	160	164	155	134
IX	119	78	106	101	83
X	74	60	60	65	48
XI	23	29	23	25	25
XII	21	18	18	19	20
Suma [kWh/m²/rok]	1087	1108	1072	1089	975

PVGIS z kolei ma rozdzielczość 4 km i dodatkowo analizuje obszary miejskie, gdzie duży udział ma promieniowanie rozproszone i odbite od budynków. Stacje meteorologiczne zlokalizowane są w większości w obszarach niezabudowanych, w okolicach lotnisk i z dużą ilością zieleni.

Na rycinie 7.6 i w tabeli 7.2 przedstawiono średnią sumę miesięczną całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na płaszczyznę horyzontalną w poszczególnych miesiącach dla szerokości geograficznej stacji meteorologicznej w Radawcu (13 km od Lublina). Przedstawione krzywe to typowe lata meteorologiczne wyznaczone metodą ISO w oparciu o 30-letnie pomiary ze stacji meteorologicznej oraz przy pomocy zdjęć satelitarnych i programu PVGIS, który opracowuje lata meteorologiczne w oparciu o 10-letnie zbiory danych. Dodatkowo linia przedstawia średnią z 3 typowych lat meteorologicznych z poszczególnych dziesięcioleci PVGIS. Wartość ISO z typowych lat meteorologicznych wyznaczonych z 30-letnich danych pomiarowych jest przez większość miesięcy mniejsza od średniej wartości wyznaczonej metodą PVGIS. Dodatkowo wybrane do danego roku meteorologicznego miesiące w metodzie PVGIS różnią się między sobą wartościami napromieniowania. Różnica ta zwiększa się w miarę wzrostu wartości napromieniowania i w miesiącach

letnich, na przykład w lipcu przekracza 59 kWh/m^2 . W miesiącach zimowych wartości napromieniowania całkowitego są porównywalne.

Zaniżone wartości typowego roku meteorologicznego wg ISO są efektem przyjętej metodologii wyboru danego miesiąca do analizy. Porównuje się summaryczne roczne wartości temperatury, wilgotności i całkowitego natężenia promieniowania słonecznego z wartościami długoterminowymi z okresu 30 lat i wybiera wartości najmniejsze. Następnie bierze się pod uwagę błędy pomiarowe związane z prędkością wiatru, który może mieć wpływ na pomiar wilgotności oraz natężenia promieniowania słonecznego, i wskazuje się miesiąc z wybranych wcześniej trzech, dla którego odchylenie średniej prędkości wiatru od miesięcznej średniej wieloletniej jest najmniejsze. W wyniku tego każdy miesiąc roku meteorologicznego ISO ma minimalne i ostrożne wartości napromieniowania. Można uznać, że w poszczególnych latach wartości rocznego napromieniowania nie występują poniżej wartości wyznaczonej metodą ISO. Tak jak przedstawiono w tabeli 7.2, całkowite napromieniowanie dla analizowanej lokalizacji wg ISO wynosi 975 kWh/m^2 , a w przypadku najniższej wartości roku meteorologicznego wg PVGIS – 1072 kWh/m^2 .



Ryc. 7.7. Średnia suma roczna natężenia całkowitego i rozproszonego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną w poszczególnych latach wyznaczone ze zdjęć satelitarnych PVGIS oraz na podstawie pomiarów i wyznaczenia typowego roku meteorologicznego wg ISO dla stacji meteorologicznej Radawiec k. Lublina

Tab. 7.3. Średnia suma roczna natężenia całkowitego i rozproszonego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną oraz średnia temperatura w poszczególnych latach wyznaczone ze zdjęć satelitarnych PVGIS oraz na podstawie pomiarów i wyznaczenia typowego roku meteorologicznego wg ISO dla stacji meteorologicznej Radawiec k. Lublina

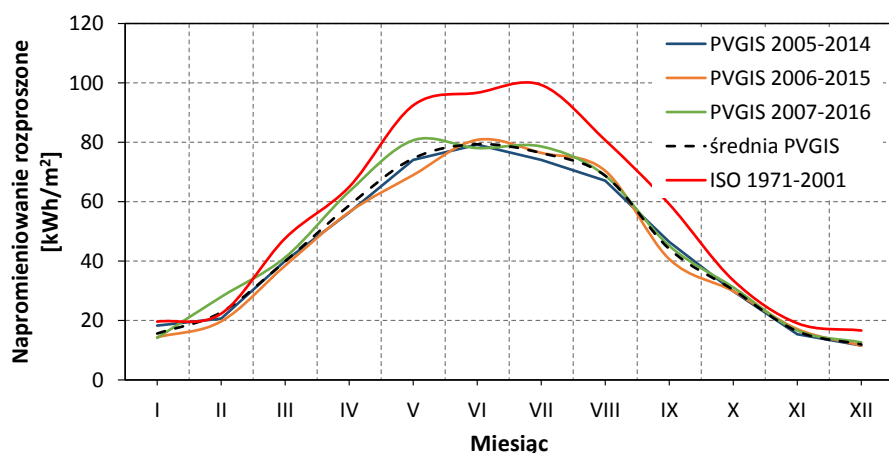
Metoda	Okres	Średnia suma roczna natężenia promieniowania słonecznego [kWh/m ²]		T_{mean} [°C]
		H	H _d	
PVGIS	2005	1148	557	8,52
	2006	1148	543	8,88
	2007	1105	537	9,70
	2008	1064	531	9,78
	2009	1125	526	8,89
	2010	1097	559	8,08
	2011	1157	570	9,12
	2012	1121	549	8,83
	2013	998	532	8,86
	2014	1106	536	9,78
	2015	1181	548	10,24
	2016	1120	550	9,66
	Średnia	1114	545	9,00
ISO	1971–2001	975	652	7,73

Na potwierdzenie tej tezy przeanalizowano na rycinie 7.7 i w tabeli 7.3 napromieniowanie całkowite na powierzchnię horyzontalną w poszczególnych latach, wyznaczone ze zdjęć satelitarnych PVGIS oraz na podstawie pomiarów i wyznaczenia typowego roku meteorologicznego wg ISO dla przyjętej lokalizacji. Najniższa wartość całkowitego rocznego napromieniowania o wartości 997 kWh/m² była w roku 2013 i zbliżyła się do wartości rocznego napromieniowania wyznaczonej metodą ISO z okresu 30 lat.

Na rycinie 7.8 i w tabeli 7.4 przedstawiono dane tylko dla średniej sumy rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na płaszczyznę horyzontalną w poszczególnych miesiącach dla szerokości geograficznej stacji meteorologicznej w Radawcu (13 km od Lublina). Przedstawione krzywe to typowe lata meteorologiczne wyznaczone metodą ISO w oparciu o 30-letnie pomiary ze stacji meteorologicznej oraz przy pomocy zdjęć satelitarnych i programu PVGIS, który opracowuje lata meteorologiczne w oparciu o 10-letnie zbiory danych. Dodatkowo linia przerywana przedstawia średnią z 3 typowych lat meteorologicznych z poszczególnych dziesięcioleci PVGIS. Pomimo że wartość napromieniowania całkowitego w metodzie ISO

ma mniejsze wartości w stosunku do PVGIS, to w przypadku promieniowania rozproszonego jest odwrotnie. Średnia z typowych lat meteorologicznych wyznaczonych z 10-letnich danych pomiarowych PVGIS jest mniejsza od wartości wyznaczonych metodą ISO i w miesiącach letnich wynosi 20%. Potwierdza to, że metoda ISO wybiera miesiące łagodne, bez ekstremalnych wartości maksymalnych temperatur, a tym samym z mniejszą wartością napromieniowania bezpośredniego. Dodatkowo wybrane do danego roku meteorologicznego miesiące w metodzie PVGIS różnią się między sobą wartościami napromieniowania. Różnica ta nie jest aż tak duża jak w przypadku analizowanego napromieniowania całkowitego, co wskazuje, że największe rozbieżności pochodzą od składnika napromieniowania bezpośredniego.

Roczne całkowite napromieniowanie dla analizowanej lokalizacji wg ISO wynosi 975 kWh/m^2 , a w przypadku najniższej wartości roku meteorologicznego wg PVGIS – 1072 kWh/m^2 . Roczne napromieniowanie rozproszone dla analizowanej lokalizacji wg ISO wynosi 652 kWh/m^2 , a w przypadku najniższej wartości roku meteorologicznego wg PVGIS – 526 kWh/m^2 .



Ryc. 7.8. Średnia suma miesięczna rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię poziomą wyznaczone jako typowy rok meteorologiczny metodą PVGIS oraz ISO dla stacji meteorologicznej Radawiec k. Lublina

Tab. 7.4. Średnia suma miesięczna i roczna rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną wyznaczone jako typowy rok meteorologiczny metodą PVGIS oraz ISO dla stacji meteorologicznej Radawiec k. Lublina

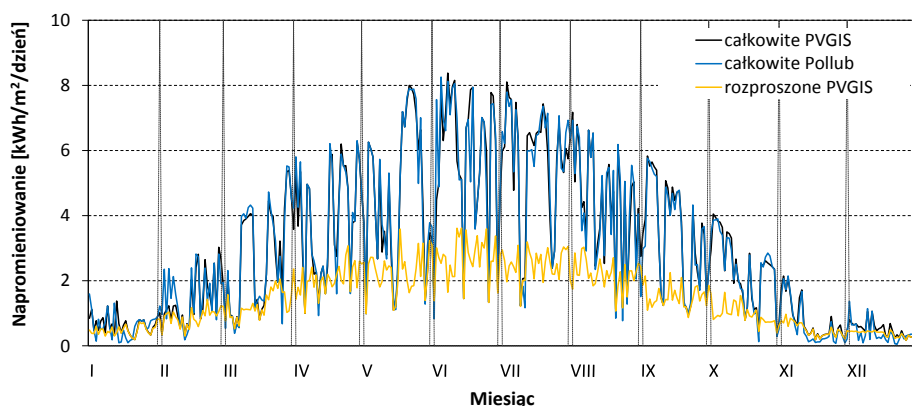
Miesiąc	Średnia suma miesięczna natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) [kWh/m ²]				
	PVGIS 2007–2016	PVGIS 2006–2015	PVGIS 2005–2014	średnia PVGIS	ISO 1971–2001
I	14	14	18	16	20
II	28	20	21	23	22
III	41	39	40	40	48
IV	63	57	56	59	65
V	81	69	74	75	92
VI	78	81	79	79	97
VII	79	76	74	76	99
VIII	69	70	67	69	81
IX	45	41	46	44	59
X	31	30	30	30	34
XI	17	17	15	16	19
XII	13	12	12	12	17
Suma [kWh/m²/rok]	559	525	533	539	652

7.2.5. Porównanie danych PVGIS oraz rzeczywistych pomiarów

Poprzednie analizy sumy natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) w ujęciu rocznym były reprezentowane jak typowy rok meteorologiczny, którego poszczególne miesiące zostały wybrane z ciągu 30 i 10 lat, w zależności od metody ISO i PVGIS. W poniższej analizie skupiono się na pomiarach napromieniowania w konkretnej lokalizacji oraz, biorąc pod uwagę dany rok kalendarzowy. Analiza ma na celu udowodnienie poprawności działania pyranometru oraz metody pomiaru napromieniowania. Duże różnice w analizie napromieniowania w wybranej lokalizacji przy użyciu dwóch różnych metod mogłyby doprowadzić do eliminacji pyranometru badawczego z analiz. Brakujące dane z pyranometrów zostały uzupełnione wartościami z PVGIS. Braki wynikały z awarii aparatury pomiarowej.

Na rycinie 7.9 przedstawiono przebieg średniej sumy dziennej wartości napromieniowania na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej w roku 2014, która pochodzi z umieszczonego pyranometru (Pollub) oraz z danych satelitarnych PVGIS. Przedstawiono

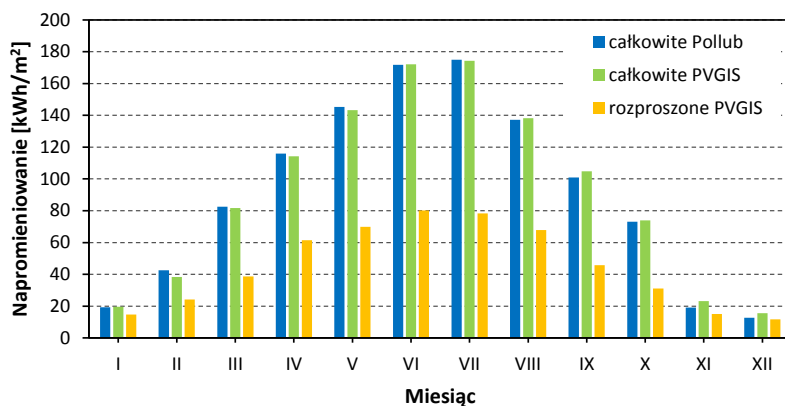
napromieniowanie całkowite, jako składową promieniowania bezpośredniego, rozproszonego i odbitego. Dane PVGIS dodatkowo prezentują napromieniowanie rozproszone, które może być w całości wykorzystane przez poruszający się pojazd. Poziomo umieszczona płaszczyzna nie odbiera promieniowania odbitego, którego wartość wynosi 0. Dni poszczególnych miesięcy zostały rozdzielone krzywą, której każda idąca do góry prosta jest ostatnim dniem miesiąca, a idąca w dół pierwszym. W warunkach słabego nasłonecznienia wartości dziennego napromieniowania uzyskane z pyranometrów są większe niż uzyskane ze zdjęć satelitarnych PVGIS. Można również zauważyć, że ponad 90% wartości napromieniowania całkowitego w poszczególnych dniach z grubą pokrywą chmur to składnik rozproszony. Stanowi on dużą część w drugiej połowie listopada, w grudniu oraz styczniu. Z kolei w warunkach dużego nasłonecznienia metoda PVGIS wskazuje większe wartości dziennego napromieniowania całkowitego niż pyranometr umieszczony na dachu budynku. Generalnie wyniki pomiarów napromieniowania całkowitego uzyskane niezależnymi metodami pomiaru pokrywają się ze sobą lub mają nieznaczne odstępstwa.



Ryc. 7.9. Przebieg średniej sumy dziennej całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej w roku 2014. PVGIS – dane satelitarne, Pollub – dane z pyranometru

W tabeli 7.5 oraz na rycinie 7.10 przedstawiono średnie sumy miesięczne oraz roczne wartości napromieniowania uzyskane z pyranometru Pollub oraz ze zdjęć satelitarnych PVGIS. Od lutego do maja miesięczne wartości napromieniowania z pyranometru są większe niż w przypadku wartości uzyskanej ze zdjęć satelitarnych PVGIS. Maksymalnie różnią się o około $4 \text{ kWh m}^2/\text{m-c}$ (luty 2014), co stanowi 10% wartości uzyskanej z pyranometru. Różnica ta

wynika z pokrywy śnieżnej, która zaburza wyniki analizy prezentowanej w programie PVGIS. W pozostałych miesiącach miesięczne wartości napromieniania rejestrowane przez pyranometr są mniejsze bądź równe wartości PVGIS. Największą różnicę na korzyść PVGIS zarejestrowano w listopadzie 2014 roku: 4 kWh/m²/m-c. W tym przypadku różnica stanowi 25%. Niemniej zarejestrowane różnice w uzyskanych miesięcznych wartościach nasłonecznienia nie wpływają znacząco na roczną wartość napromieniania. W przypadku PVGIS jego roczna wartość wynosi 1099 kWh/m² i 1095 kWh/m² dla pyranometru Pollub. Można uznać, że wyniki z danych satelitarnych nadają się do szacowania dostępności energii słonecznej na obszarze miejskim. Ponad 77% promieniowania słonecznego dociera do poziomej powierzchni na analizowanym obszarze w sześciu miesiącach wiosenno-letnich – od kwietnia do września. Miesięczna wartość napromieniania całkowitego w tym okresie jest w zakresie 100–174 kWh/m² i średnio wynosi 141 kWh/m². Blisko tego zakresu jest również napromienianie całkowite rejestrowane w marcu i październiku. Korzystna wartość napromieniania występuje w drugiej połowie marca i pierwszej połowie października. W prezentowanym okresie wiosenno-letnim ponad 74% promieniowania rozproszonego dociera do analizowanej powierzchni, dając sumaryczną wartość 403 kWh/m².



Ryc. 7.10. Przebieg średniej sumy miesięcznej całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniania) na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej w roku 2014. PVGIS – dane satelitarne, Pollub – dane z pyranometru

Tab. 7.5. Średnia suma miesięczna całkowitego natężenia promieniowania (napromieniowanie) [kWh/m²/m-c] na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej w roku 2014. PVGIS – dane satelitarne, Pollub – dane z pyranometru

Miesiąc	Średnia suma miesięczna natężenia promieniowania słonecznego [kWh/m ²]			
	Pollub	PVGIS		udział H_d
		H	H_d	
I	19,2	19,7	14,7	75%
II	42,6	38,3	24,1	63%
III	82,6	81,7	38,6	47%
IV	115,9	114,3	61,4	54%
V	145,3	143,3	69,8	49%
VI	171,8	172,1	80,2	47%
VII	174,9	174,2	78,3	45%
VIII	137,2	138,2	67,8	49%
IX	100,9	104,8	45,8	44%
X	73,1	73,9	31,0	42%
XI	19,1	23,2	15,1	65%
XII	12,7	15,5	11,6	75%
Suma [kWh/m²/rok]	1095,4	1099,2	538,3	49%

Przedstawiona wartość napromieniowania rozproszonego zmienia się proporcjonalnie do napromieniowania całkowitego. W miesiącach zimowych stanowi ponad 75% promieniowania całkowitego, a w letnich ze względu na promieniowanie bezpośrednie i długi okres operacji Słońca wynosi 49%. Najniższa wartość promieniowania rozproszonego występuje w październiku, w którym stanowi tylko 42% promieniowania bezpośredniego. W warunkach miejskich wykorzystanie składnika bezpośredniego w tym miesiącu jest ograniczone ze względu na zabudowę, która zacienia powierzchnię dachu pojazdu oraz nisko położoną tarczę słoneczną nad poziomem ziemi. W ciągu całego roku pojazd miejski może z całą pewnością wykorzystać składnik rozproszony napromieniowania słonecznego, który wynosi 538 kWh/m² i stanowi średnio około połowę całkowitego napromieniowania. W dalszej części pracy zostanie przeanalizowany wpływ poruszania się pojazdu na dostępność promieniowania odbitego od infrastruktury miejskiej oraz bezpośredniego pochodzącego z tarczy słonecznej.

7.3. Metodologia pomiaru natężenia promieniowania słonecznego

Badania prowadzone były równolegle na czterech poruszających się po ulicach autobusach marki Mercedes model Conecto G i LF z zamontowanymi instalacjami fotowoltaicznymi. W Polsce jest około 300 takich autobusów, a na świecie powyżej 33 tys. sztuk. Badania przeprowadzono w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów, korzystając z opracowanego układu pomiarowo-rejestrującego przesyłającego dane w czasie rzeczywistym. Wyniki uzyskane na stanowisku mobilnym porównywano z uzyskiwanymi na stanowisku stacjonarnym, tj. instalacji referencyjnej na budynku Wydziału Mechanicznego w okolicach centrum miasta Lublina. Stacjonarne stanowisko pomiarowe umożliwiało rejestrację energii elektrycznej z jednostki powierzchni modułów fotowoltaicznych, natężenia promieniowania słonecznego oraz warunków pogodowych. Wyniki pomiarów były podstawą do porównania ilości energii słonecznej docierającej do ruchomej i nieruchomej powierzchni, a także analizy efektu redukcji promieniowania słonecznego poprzez zacienianie oraz efektu chwilowego zwiększania ilości światła do poruszającego się obiektu poprzez promieniowanie odbite.

Referencyjne stanowisko pomiarowe przedstawione na rycinie 7.11 umożliwiało ciągły pomiar w czasie rzeczywistym natężenia promieniowania słonecznego za pomocą pierwszej klasy pyranometru firmy Hukseflux o oznaczeniu SR12. Dodatkowo analizowano warunki atmosferyczne oraz produktywność różnych technologii modułów fotowoltaicznych, między innymi identycznego modułu, jaki zamontowano na poruszającym się po ulicach miasta autobusie miejskim. Moduły oraz układy pomiarowe przymocowano do stalowej ramy pokrytej płytami z tworzywa sztucznego (kronolit). Rama została wypoziomowana. Moduły przymocowano do kronolitu dwustronną taśmą klejącą. Stanowi to również podstawę do testowania sposobu mocowania modułów na dachu autobusu. Wygenerowana energia elektryczna uzyskana z modułów została rozproszona w postaci ciepła na radiatorach (ryc. 7.12a). Został także opracowany układ obciążający moduły fotowoltaiczne zlokalizowane wewnątrz budynku wraz z układem rejestracji i akwizycji danych.

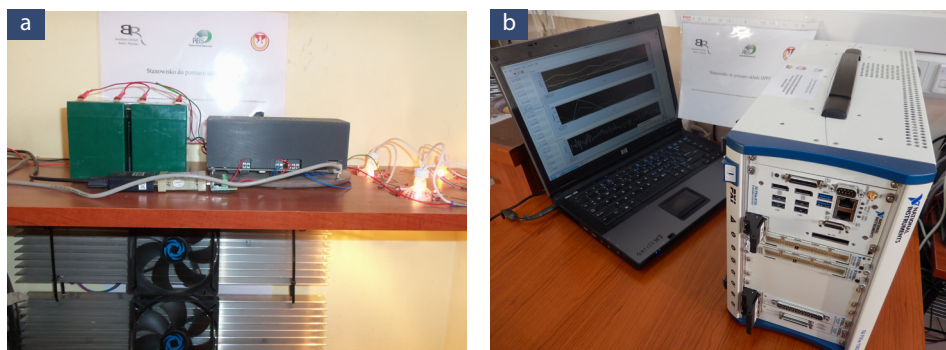
Stacjonarny układ rejestracji, analizy i archiwizacji danych (ryc. 7.12b) składał się z uniwersalnego modułu obsługi maksymalnie 8 kart pomiarowych, zgodnego ze standardem PXI NI PXIe-1082, z kontrolera do systemu pomiarowego zgodnego ze standardem PXI NI PXIe-8135, wraz z systemem

operacyjnym Windows oraz Real-Time, modułu wejść analogowych napięciowych i do pomiaru natężenia prądu NI 9203 oraz z zasilacza.



Ryc. 7.11. Moduły fotowoltaiczne z czujnikiem napromieniowania SR12 na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

W badaniach wzięto pod uwagę 367 przykładowych dni globalnego promieniowania słonecznego rejestrowanego w sposób ciągły na Budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, położonego na $51^{\circ}15'N$ szerokości geograficznej północnej i $22^{\circ}34'E$ długości geograficznej wschodniej. W regionie tym na podstawie PVGIS maksymalne średnie napromieniowanie dla powierzchni poziomej jest w czerwcu i wynosi 6 kWh/m^2 na dzień. W miesiącach zimowych wartość ta spada. Zmienne napromieniowanie w połączeniu z położeniem na lądzie sprawia, że wahania temperatury są dość duże, między -2 a 20°C , a wilgotność względna między 67% a 84%. Badania prowadzono przez cały rok, od stycznia do grudnia, we wszystkich warunkach pogodowych panujących w Lublinie, przy zróżnicowanej liczbie pasażerów w autobusie miejskim w ciągu doby oraz przy zróżnicowanym obciążeniu elektrycznym i zużyciu paliwa w autobusie. Wszystkie parametry były rejestrowane codziennie w godzinach 4:00–23:30 (dzienna eksploatacja autobusu). Wyniki rejestrowano z częstotliwością 2 Hz. Wyniki badań odnosiły się do całego roku, dzięki czemu można było określić wpływ zróżnicowanych warunków pogodowych i obciążenia na pracę pojazdu. W celu weryfikacji tras autobusu zamontowano w nim odbiornik GPS firmy Garmin, a autobus był eksploatowany w ciągu roku na różnych trasach. Globalne pomiary promieniowania słonecznego zostały zebrane przy częstotliwości próbkowania 1 Hz (lub czasie próbkowania $T_s = 1 \text{ s}$) w okresie jednego roku (od stycznia 2014 do stycznia 2015); stanowi to 31 708 800 punktów pomiarowych.



Ryc. 7.12. Układ do obciążenia elektrycznego modułów fotowoltaicznych wraz z wentylatorami chłodzącymi (a), uniwersalny moduł pomiarowy PXI NI PXIe-1082 (b)

7.4. Narzędzia i przyrządy pomiarowe

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano dwa typy pyranometrów przeznaczonych do oceny zasobów energii słonecznej oraz walidacji wydajności modułów fotowoltaicznych:

- Hukseflux SR03,
- Hukseflux SR12 z wbudowanym czujnikiem temperatury Pt100.

Pyranometr jest instrumentem do pomiaru hemisferycznego natężenia promieniowania słonecznego całkowitego, rozproszonego i odbitego, najczęściej całego widma światła słonecznego, chociaż możliwe jest ograniczenie zakresu widma poprzez używanie kolorowych kopuł lub filtrów. Nazwa pyranometr pochodzi od greckiego *pyr*, co oznacza „płomień”, i *ano*, co oznacza „niebo”. Pyranometr mierzy irradiancję, czyli strumień przychodzącej energii słonecznej wyrażonej w watach na metr kwadratowy. Pyranometr zbudowany przez Andersa Knutsona Ångströma miał element pochłaniający promieniowanie w postaci szachownicy z polami na przemian białymi i poczernionymi. Były to termoelementy manganinowo-konstantanowe. Pyranometr działa na zasadzie termostosów, w których sygnał elektryczny generowany jest w wyniku różnicy temperatury eksponowanych i nieeksponowanych na promieniowanie słoneczne elementów. Wskutek różnicy pochłaniania promieniowania przez poczernione i niepoczernione powierzchnie, wytwarza się różnica temperatur między spoinami, proporcjonalna do natężenia promieniowania. Między końcami termobaterii wytwarza się siła elektromotoryczna powodująca wychylanie się wskazówki galwanometru.

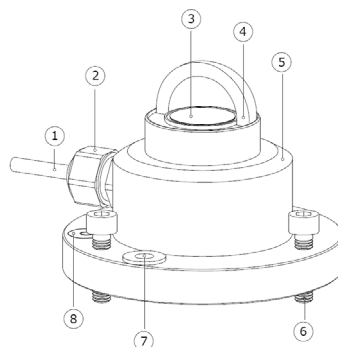
Norma ASTM E2848 „Standard Test Method for Reporting Photovoltaic Non-Concentrator System Performance” (wydana pod koniec 2011 roku) potwierdza, że pyranometr jest preferowanym narzędziem do badań fotowoltaicznych na zewnątrz. Pyranometry są używane w meteorologii, klimatologii i badaniach ilości przychodzącej energii słonecznej. Mają również nadane standardy (ISO9060). Międzynarodowa Organizacja Meteorologiczna (World Meteorological Organisation – WMO) rozróżnia 3 klasy. Najlepsze instrumenty mają klasę „standard przeniesiony” (ang. *secondary standard*), następnie są instrumenty „pierwszej klasy” (ang. *first class*) oraz najmniej dokładne instrumenty „drugiej klasy” (ang. *second class*). Światowa Organizacja Meteorologiczna zatwierdziła „metodę pyranometryczną” obliczania czasu trwania usłonecznienia z pomiarów za pomocą pyranometru w tekście „WMO-No. 8, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation”.

Pyranometry zostały umieszczone obok modułów fotowoltaicznych na czterech autobusach miejskich oraz na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Modele SR03 zostały podłączone do instalacji fotowoltaicznej na dachu autobusów miejskich, model SR12 – do instalacji stacjonarnej. W tabeli 7.6. przedstawiono specyfikację używanych pyranometrów.

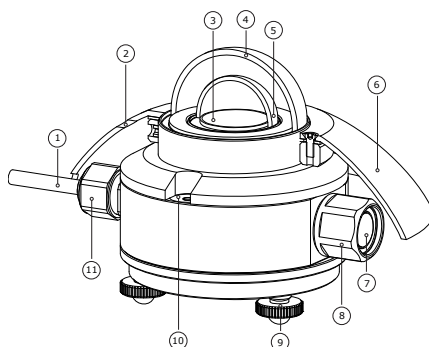
Pyranometr SR03 zastosowany na dachach autobusów (ryc. 7.13) to najszybszy czujnik promieniowania słonecznego drugiej klasy ISO9060 dostępny na rynku. Spełnia wymagania Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO). Osiąga 95% czasu odpowiedzi w ciągu 1 s. Jest dostosowany do sprawdzania wydajności instalacji fotowoltaicznych, gdzie jest wymagana długoterminowa stabilność i synchronizacja pomiędzy modułem fotowoltaicznym a pyranometrem. SR03 służy do pomiaru natężenia promieniowania słonecznego, który pada na gładką powierzchnię w polu widzenia 180° w W/m^2 , zwany także globalnym lub półkulistym promieniowaniem słonecznym. Pyranometr działa całkowicie biernie na podstawie czujnika termoelektrycznego, generując małe napięcie wyjściowe proporcjonalnie do strumienia. W przeciwieństwie do fotodiody i instrumentów opartych o czarno-białą szachownicę ma widmowo płaską charakterystykę w pełnym spektrum słonecznym. SR03 może być używany przy ogólnych obserwacjach meteorologicznych, testach klimatycznych i badaniu kolektorów słonecznych, jednakże ze względu na jego krótki czas reakcji jest odpowiedni do aplikacji fotowoltaicznych, gdzie ten parametr jest bardziej istotny niż w innych zastosowaniach. Istnieje także możliwość wykorzystywania tego pyranometru na statkach i samolotach, również z czujnikiem przechyłu. SR03 spełnia normy ISO9060 i 9847 (kalibracja), WMO-No. 8, ASTM E2848 i IEC 61724. Specyfikację pyranometru przedstawiono w tabeli 7.6, a jego schemat na rycinie 7.13b.

Tab. 7.6. Specyfikacja pyranometrów [232]

Parametr	Pyranometr SR03	Pyranometr SR12
Klasyfikacja wg ISO	druga klasa	pierwsza klasa
Zakres spektralny [nm]	305 do 3000	300 do 3000
Czułość [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$]	7–15	15
Temperatura pracy [$^{\circ}\text{C}$]	-40 do +80	-40 do +80
Zakres pomiarowy [W/m^2]	0 do 2000	0 do 2000
Czas odpowiedzi (95%) [s]	1	18
Czujnik temperatury	brak	Pt100
Fotografia		



Ryc. 7.13. Pyranometr SR03 zabudowany na dachu autobusu 332. 1 – kabel, 2 – dławik, 3 – czujnik, 4 – szklana kopuła, 5 – obudowa, 6 – wkręt ustalający, 7 – otwór mocujący, 8 – poziomic



Ryc. 7.14. Schemat pyranometru SR-12. 1 – przewód, 2 – wkręt osłony, 3 – czujnik, 4, 5 – podwójna szklana kopuła, 6 – osłona przeciwsłoneczna, 7, 8 – wskaźnik wilgotności z osuszaczem, 9 – regulowana stopka, 10 – poziomica, 11 – dławik, Na podstawie [232]

Na dachu budynku zastosowano pyranometr SR12, który ma wysoką dokładność pomiaru promieniowania słonecznego i spełnia normy ISO 9060 dla pierwszej klasy pyranometrów w badaniach energii słonecznej (*solar energy test applications*). Pyranometr SR12 (ryc. 7.14) ma podwójną szklaną kopułę, system podgrzewania oraz dodatkowy czujnik temperatury. Włączony podgrzewacz (1,6 W) redukuje błędy pomiarowe spowodowane osadzaniem się rosy, szronu, śniegu itp. Wszystkie czujniki są indywidualnie testowane na kierunkowe odpowiedzi. Zastosowana metoda kalibracji skutkuje niepewnością czułości na poziomie 1,8% w porównaniu do typowych niepewności dla tej klasy pyranometrów wynoszącej powyżej 2,8%. Standard ASTM E2848 potwierdza zgodność instrumentu z wymogami testów fotowoltaicznych. SR12 jest także pierwszym w swoim rodzaju pyranometrem zgodnym ze standardem ISO 9060 w kategorii badań energii słonecznej (*solar energy test applications*). Specyfikację pyranometru przedstawiono w tabeli 7.6, a jego schemat na rycinie 7.14. Pyranometr ma pole widzenia 180° i mierzy natężenie promieniowania słonecznego w W/m², które dociera do urządzenia z pełnej półsfery.

Schemat pomiaru natężenia promieniowania słonecznego przedstawiono na rycinie 7.15. Pyranometry zostały podłączone do przetworników napięciowo-prądowych, które zamieniają sygnał napięciowy U z pyranometru, wyrażony w jednostkach mV, na sygnał prądowy I wyrażony w mA. Charakterystyka przetwornika ma postać:

$$I = A + B \cdot U \quad (7.2)$$

gdzie:

U – napięcie wychodzące z pyranometru wchodzące do przetwornika [mV],

I – natężenie prądu wychodzące z przetwornika [mA],

A, B – stałe z charakterystyki przetwornika.

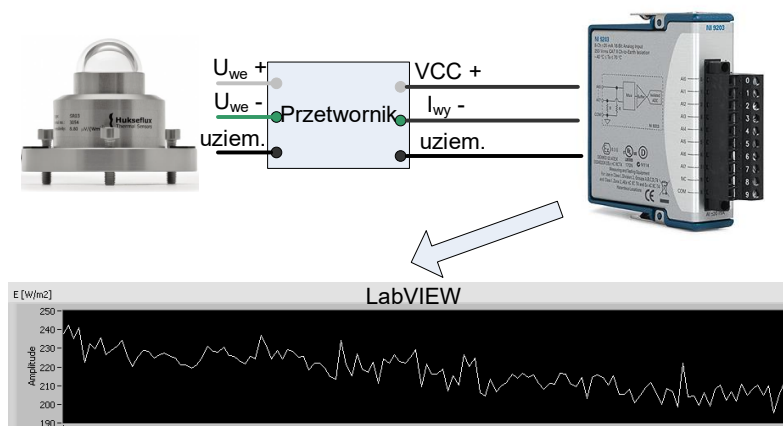
Karta prądowa, mierząc natężenie prądu i uwzględniając wartość czułości pyranometru, zamienia sygnał na wartość natężenia promieniowania słonecznego w programie LabVIEW wg zależności:

$$E = \frac{(I - A) \cdot 1000}{S \cdot B} \quad (7.3)$$

gdzie:

E – natężenie promieniowania słonecznego [W/m²],

S – czułość pyranometru [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$].



Ryc. 7.15. Schemat pomiaru promieniowania słonecznego [173]

W tabeli 7.7. przedstawiono podstawowe dane pyranometrów i podłączonych do nich przetworników. Tabela zawiera numer seryjny, czułość, rezystancję, czas odpowiedzi danego czujnika oraz charakterystykę podłączonego do niego przetwornika. Wszystkie dane pochodzą z certyfikatów kalibracji pyranometrów i kart katalogowych przetworników.

Tab. 7.7. Zestawienie użytych pyranometrów

Pyranometr	SR12 -T1-05 Budynek	SR03-05 Autobus 311	SR03-05 Autobus 310	SR03-05 Autobus 332	SR03-05 Autobus 333
Nr seryjny	1181	3110	3128	3111	3130
Charakterystyka przetwornika $I_{wy} [mA]$	$4,0086 + U \times 0,79898$	$3,9986 + U \times 1,0007$	$4,0239 + U \times 0,9990$	$3,998 + U \times 1,0000$	$3,9276 + U \times 1,0003$
Czułość $[\mu V/(W/m^2)]$	12,93	8,26	10,65	10,62	10,02
Rezystancja $[\Omega]$	50,9	165,3	176,2	171,2	167,8
Czas odpowiedzi (95%) [s]	12	2,1	1,8	2,0	1,6

8. Model matematyczny pojazdowego systemu fotowoltaicznego

8.1. Struktura modelu

Opracowano model systemu fotowoltaicznego zintegrowanego z pojazdem miejskim i jego instalacją elektryczną w celu oszacowania stopnia redukcji energii elektrycznej produkowanej na pojeździe z systemu PV w stosunku do energii produkowanej na otwartej przestrzeni. Model ten zawiera elementy stochastyczne, uwzględniające ukryte powiązania pomiędzy porą dnia, trasą autobusu i lokalizacją geograficzną a wielkością strumienia energii świetlnej docierającej do dachu autobusu.

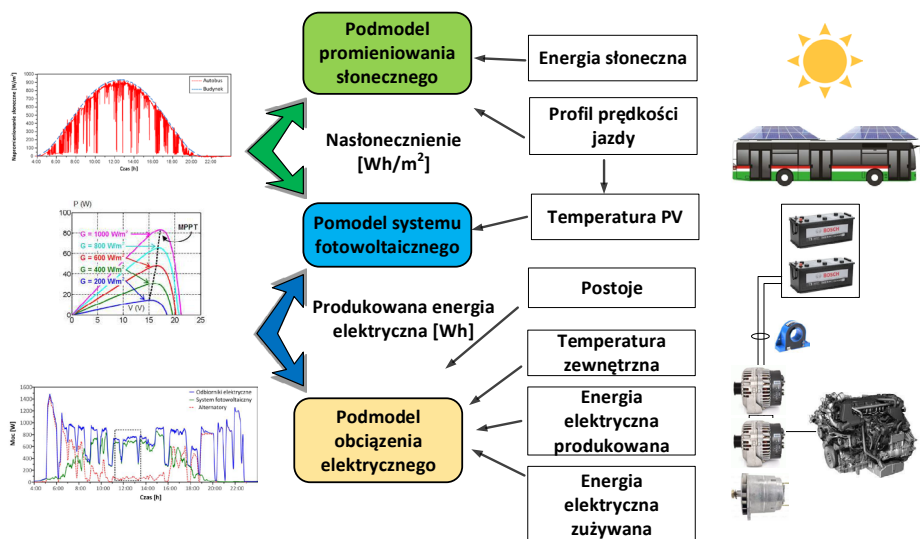
Model przedstawiony na rycinie 8.1 składa się z trzech podmodeli związanych z następującymi problemami badawczymi:

1. Podmodel promieniowania słonecznego, w którym zostanie rozpoznana ilość energii słonecznej docierającej do płaskiej powierzchni zlokalizowanej na nieruchomym obiekcie oraz na poruszającym się autobusie miejskim jeżdżącym po ulicach Lublina.
2. Podmodel systemu fotowoltaicznego, w którym zostanie rozpoznany wpływ temperatury zewnętrznej, natężenia promieniowania słonecznego oraz profilu prędkości jazdy na proces produkcji energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych.
3. Profil prędkości autobusu wpływa na opływ powietrza wokół paneli fotowoltaicznych i efekt ich chłodzenia. Sposób eksploatacji autobusu

i realizowany styl jazdy w postaci cykli jazdy są skorelowane z podmodelem promieniowania słonecznego i podmodelem systemu fotowoltaicznego przez prędkość powietrza omywającego i chłodzącego system PV.

4. Podmodel obciążenia elektrycznego autobusu, w którym zostanie rozpoznana ilość energii elektrycznej zużywanej oraz produkowanej z systemu fotowoltaicznego oraz przez alternator w ogólnym bilansie energetycznym pojazdu w funkcji czasu, okresów eksploatacji (pory roku i dnia) oraz temperatury zewnętrznej.

W podmodelu zostaną zidentyfikowane stan jazdy oraz postoju. Wartość wyjściowa z podmodelu promieniowania słonecznego w postaci natężenia promieniowania słonecznego wpływa na ilość produkowanej energii elektrycznej. Jest ona związana z ilością energii słonecznej, która zwiększa temperaturę w ogniwach fotowoltaicznych i ogranicza moc wyjściową z systemu. Podmodel związany jest z temperaturą na zewnątrz. Głównym odbiornikiem elektrycznym są wentylatory nawiewno-wywiewne, które intensywnie pracują w niskich i wysokich temperaturach powietrza atmosferycznego. System fotowoltaiczny, wprowadzając dodatkowy strumień energii, pozwala ograniczyć obciążenie alternatorów napędzanych silnikiem spalinowym. Istnieje graniczny odcinek czasu różniący się długością w zależności do wartości napromieniania w poszczególnych porach roku i dnia, po przekroczeniu którego instalacja elektryczna pojazdu nie przyjmuje energii elektrycznej z systemu PV w czasie postoju, by nie przeładować akumulatorów.



Ryc. 8.1. Model matematyczny pojazdu z systemem fotowoltaicznym

8.2. Budowa modelu na podstawie lokalizacji geograficznej

Zasadniczo urządzenia fotowoltaiczne są przetwornikami energii, które zamieniają energię cieplną ze Słońca na energię elektryczną w zależności od warunków otoczenia, które są różne w poszczególnych szerokościach geograficznych. Oznacza to, że ogniwo słoneczne, jak każdy silnik cieplny, jest ostatecznie ograniczone przez sprawność Carnota [125], [100]. Jednak nawet idealne urządzenia PV różnią się od silników Carnota tym, że wymiana ciepła odbywa się na skutek promieniowania, energia cieplna emitowana przez ogniwo jest uważana za stratę, a górnym źródłem ciepła jest Słońce. Ponadto wymiana ciepła przez promieniowanie elektromagnetyczne emitowane w wyniku cieplnego ruchu cząsteczek nie wymaga obecności ośrodka pomiędzy ciałami, między którymi ciepło jest wymieniane.

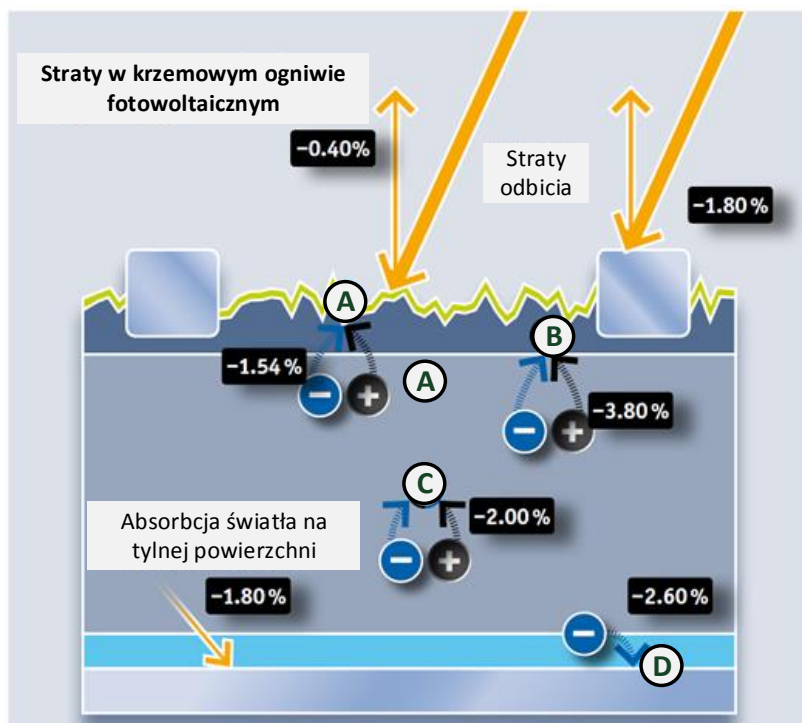
Typowe ogniwa PV absorbują fotony słoneczne pod małym kątem padania światła stałego, podczas gdy emitują pod znacznie szerszym kątem padania światła stałego. Dodatkowo dla typowych pojedynczych ogniw występują znaczne straty wynikające z niedopasowania spektralnego pomiędzy promieniowaniem padającym a absorpcją w ogniwie, które generuje nośniki elektryczne.

Sprawność ogniw słonecznych jest ograniczona przez trzy mechanizmy strat [185]:

- Straty fotonów spowodowane odbiciem powierzchniowym, transmisją objętościową krzemu i absorpcją styków tylnych.
- Straty nośnika mniejszościowego (elektrony w obszarze p i otwory w obszarze n) spowodowane rekombinacją w masie krzemu i na powierzchni.
- Utrata ciepła spowodowana rezystancją szeregową w liniach siatki i szynach zbiorczych, na styku z krzemem oraz w obszarze masy krzemu i warstwy tylnej.

Sprawność ogniwa słonecznego jest ograniczona przez absorpcję optyczną, transport i zbieranie nośników ładunku. Energia światła może być wykorzystana tylko wtedy, gdy ujemne nośniki ładunku docierają do styków na przedniej stronie ogniwa, a dodatkowo nośniki ładunku docierają do tych z tyłu. Największe straty, które występują w ogniwie, wynikają z neutralizacji wzajemnych nośników ładunku dodatniego i ujemnego (straty rekombinacji). Występują one wszędzie tam, gdzie półprzewodnik kryształu zawiera defekty i odbiega od ściśle regularnej struktury. Dzieje się tak w przypadku powłoki antyrefleksyjnej, emitera, a nawet materiału bazowego z tyłu komórki. W przypadku

ogniów krzemowych maksymalna teoretyczna sprawność wynosi 29% i jest ograniczona stratami wynikającymi z nadmiaru energii fotonów znajdujących się w luce międzypasmowej, przezroczystością dla fotonów znajdujących się poniżej luki międzypasmowej oraz rekombinacją promieniowania i Augera. W praktyce ogniwa słoneczne wykazują znacznie niższą sprawność z powodu dodatkowych strat. Przez wiele lat sprawność dostępnych na rynku ogniów krzemowych na bazie płytek ceramicznych utrzymywała się na stałym poziomie od 14% do 15%. Przemysł wyprodukował „ogólne” ogniwo słoneczne z mechanizmem wielokrotnych strat: strata sprawności wynosząca 3,6% spowodowana napromieniowaniem odbitym na powierzchni czołowej lub nieproduktywnie wchłoniętym na styku tylnym; strata wynosząca 2% spowodowana łączeniem się nośników oraz strata wynosząca kolejne 8,6% spowodowana rekombinacją na styku i utratą rezystancji (ryc. 8.2). Opracowano szereg wysokowydajnych koncepcji mających na celu zmniejszenie strat i zbliżenie się do ideału 29%. Chociaż naukowcy zastosowali te koncepcje, aby osiągnąć sprawność na poziomie 25% w urządzeniach laboratoryjnych, wyzwaniem jest opracowanie rozwiązań, które mogą być wdrożone na tanich, masowych liniach produkcyjnych.



Ryc. 8.2. Mechanizmy strat w krzemowym ogniwie fotowoltaicznym

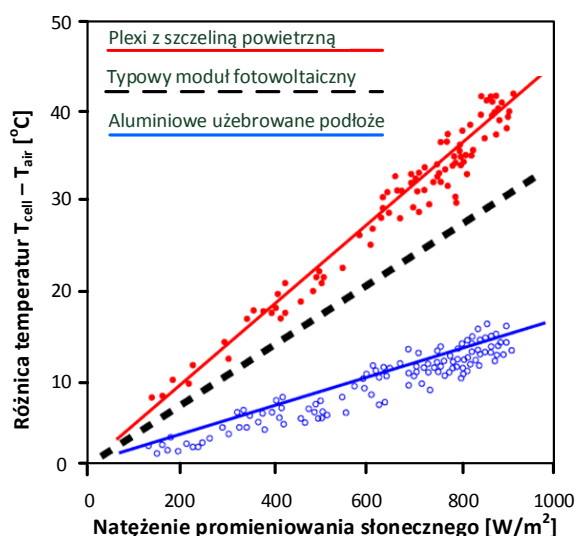
8.3. Wpływ napromieniowania i temperatury otoczenia

Podobnie jak wszystkie inne elementy półprzewodnikowe ogniwa słoneczne są wrażliwe na temperaturę. Wzrost temperatury zmniejsza szczelinę w paśmie półprzewodnika, wpływając tym samym na większość parametrów materiału półprzewodnika. Zmniejszenie luki pasmowej półprzewodnika przy wzrastającej temperaturze może być traktowane jako zwiększenie energii elektronów w materiale. Niższa energia jest więc potrzebna do przerwania wiązania. W modelu wiązania półprzewodnikowej szczeliny pasmowej redukcja energii wiązania również zmniejsza szczelinę pasmową. Dlatego też zwiększenie temperatury zmniejsza szczelinę w wiązaniu. W praktyce luki pasmowe półprzewodników zmieniają się zasadniczo wraz z temperaturą. Zmiany te wynikają z modyfikacji energii pasmowej wywołanej interakcjami elektronowo-fonowymi oraz rozszerzalnością cieplną sieci [56].

Znamionowa moc elektryczna, oznaczana jako P_{rated} ogniw/modułów fotowoltaicznych, wyrażona w Watach (ozn. W, Wp), jest podawana w warunkach pomiarowych STC (Standard Test Conditions). STC to standardowe warunki testowe, w których pomiar występuje przy natężeniu promieniowania słonecznego o wartości 1000 W/m^2 , przy temperaturze ogniwa 25°C oraz współczynniku masy powietrza AM 1,5. Parametr AM = 1,5 określa, że promienie słoneczne padają pod kątem $48,2^\circ$ w stosunku do położenia Słońca w zenicie. W warunkach rzeczywistych nie jest możliwe utrzymanie tak niskiej temperatury ogniwa przy tak dużym napromieniowaniu (temperatura pracy $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ i natężenie promieniowania słonecznego $E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$). Należy zauważyć, że podczas gdy STC reprezentuje standardowe warunki laboratoryjne, nominalne środowisko termiczne określone w modelu NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) [66] reprezentuje warunki, w których moduł PV jest zazwyczaj wystawiony na działanie Słońca po zainstalowaniu go na zewnątrz. Parametry wydajnościowe modułu fotowoltaicznego dla warunków NOCT są bardziej obiektywne i bliższe rzeczywistym, osiąganym podczas normalnego użytkowania. Bezpośrednia korelacja między temperaturą otoczenia a temperaturą pracy modułu określona została w normach Amerykańskiego Stowarzyszenia Badań i Materiałów ASTM (American Society for Testing and Materials) przez nominalną temperaturę pracy modułu o oznaczeniu T_{NOCT} . Określa ona skłonność modułu do nagrzewania się w czasie pracy. Temperaturę mierzy się w następujących warunkach [203]:

- natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni modułu – 800 W/m^2 ,
- temperatura powietrza – 20°C ,
- prędkość wiatru – 1 m/s .

Na rycinie 8.3 przedstawiono różnicę temperatury pomiędzy ogniwem a powietrzem nad modułem w funkcji natężenia promieniowania słonecznego dla trzech wolnostojących konstrukcji modułów fotowoltaicznych na podstawie pomiarów [182]. Przedstawione charakterystyki pokazują, że zarówno straty przewodzenia, jak i konwekcyjne są liniowe w zależności od natężenia promieniowania dla danej prędkości wiatru, pod warunkiem że opór cieplny i współczynnik wymiany ciepła nie zmieniają się znacząco w funkcji temperatury. Najlepsze chłodzenie (najniższe różnice temperatur) ma moduł z aluminiowym uźebrowanym podłożem ogniw fotowoltaicznych, co zmniejsza opór cieplny i zwiększa powierzchnię konwekcji.



Ryc. 8.3. Różnica temperatury pomiędzy ogniwem a powietrzem w funkcji natężenia promieniowania słonecznego dla trzech konstrukcji modułów fotowoltaicznych: plexi ze szczeliną powietrzną, aluminiowe uźebrowane podłoże, typowy moduł fotowoltaiczny na podstawie pomiarów przy prędkości wiatru 1 m/s i z otwartym tyłem. Opracowanie własne na podstawie [182]

Najczęstszą wartością temperatury T_{NOCT} jest 48°C [65], [146], ale notowane były wartości z przedziału od 33°C do 58°C w zależności od rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i materiałowych modułów [183]. Im niższa jest temperatura NOCT, tym wyższej klasy jest moduł.

Moduł fotowoltaiczny jest zwykle obliczany w temperaturze 25°C przy natężeniu promieniowania słonecznego 1000 W/m^2 . Jednak podczas eksploatacji w warunkach rzeczywistych pracują one zazwyczaj w wyższych temperaturach i przy nieco niższym napromienianiu słonecznym. Aby określić moc wyjściową ogniw słonecznych, ważne jest określenie oczekiwanej temperatury

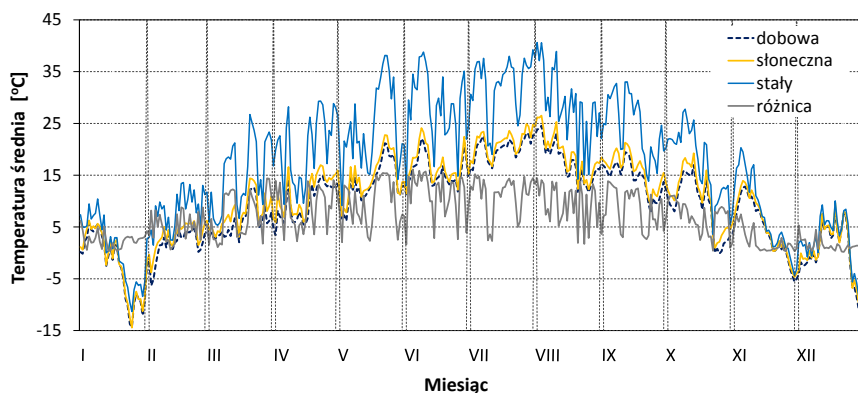
pracy modułu PV. Równania dla promieniowania słonecznego i różnicy temperatur pomiędzy modulem a powietrzem pokazują, że zarówno straty przewodzenia, jak i konwekcyjne są liniowe w zależności od napromieniowania dla danej prędkości wiatru, pod warunkiem że opór cieplny i współczynnik wymiany ciepła nie zmieniają się znacząco w funkcji temperatury. W przedstawionym modelu termicznym oszacowano temperaturę pracy ogniwa na podstawie aktualnego natężenia promieniowania słonecznego i temperatury powietrza oraz nominalnej temperatury pracy ogniwa (NOCT). Przybliżone równanie do obliczania temperatury ogniwa zostało określone przez [183]:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right) \cdot E \quad (8.1)$$

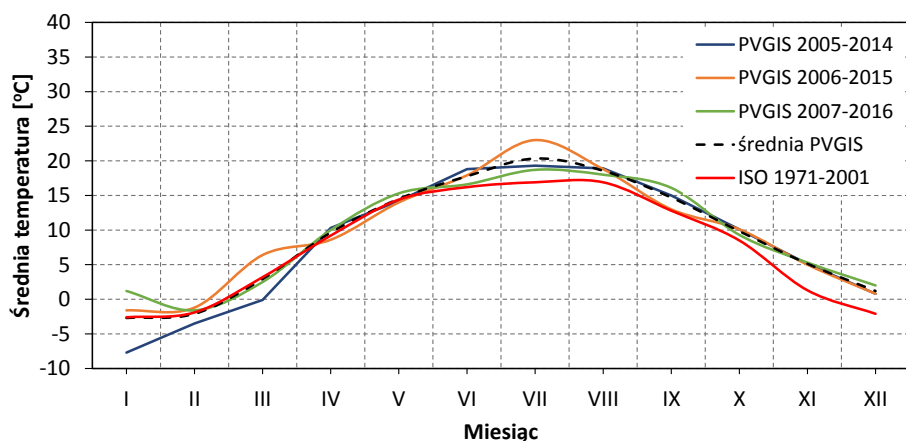
gdzie:

- T_{cell} – rzeczywista temperatura pracy ogniwa [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{amb} – zmierzona temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{NOCT} – znamionowa temperatura pracy ogniwa [$^{\circ}\text{C}$],
- E – natężenie promieniowania słonecznego [W/m^2].

Równanie to może zostać zastosowane do analizy temperatury ogniwa fotowoltaicznego zamontowanego stacjonarnie na budynku. Na rycinie 8.4. przedstawiono przebieg średniej temperatury w ciągu doby, dnia (wschód–zachód Słońca) i ogniwa w kolejnych dniach w roku 2014. Szereg czasowy średniej temperatury w ciągu danego dnia roku przedstawia dwie krzywe oznaczone jako „dobowa” i „słoneczna”. Pierwsza z nich to średnia temperatura odniesiona do całej doby, z kolei druga to temperatura rejestrowana i uśredniana dla danego dnia w czasie operowania Słońca (wartość napromieniowania większa od 0). Średnia temperatura otoczenia T_{amb} została opracowana na podstawie danych temperaturowych powietrza rejestrowanych jako typowy rok meteorologiczny metodą PVGIS-SARAH dla miasta Lublin w czasie napromieniowania (na wykresie temperatura słoneczna). Średnia temperatura dobowa została wyznaczona z szeregów czasowych temperatury w czasie 24 godzin również ww. metodą, zarówno w czasie dnia, jak i nocy. Temperaturę ogniwa wyznaczono, wykorzystując wzór 8.1, na podstawie szeregu czasowego średniej temperatury słonecznej i średniej, dziennej wartości, którą uzyskano, dzieląc wartość zmierzonego całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (ryc. 7.9), wyrażonego w $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dzień}$, przez liczbę godzin operowania Słońca.



Ryc. 8.4. Przebieg średniej dziennej temperatury otoczenia w kolejnych dniach w roku 2014 wyznaczonej jako typowy rok meteorologiczny metodą PVGIS-SARAH dla miasta Lublin, dobowa – średnia dla danego dnia z 24 godzin, słoneczna – średnia dla danego dnia z godzin z napromienianiem. Temperatura ogniwa wyznaczona na podstawie średniej temperatury słonecznej i zarejestrowanego napromieniania



Ryc. 8.5. Średnia miesięczna temperatura wyznaczona jako typowy rok meteorologiczny metodą PVGIS oraz ISO dla stacji meteorologicznej Radawiec k. Lublina

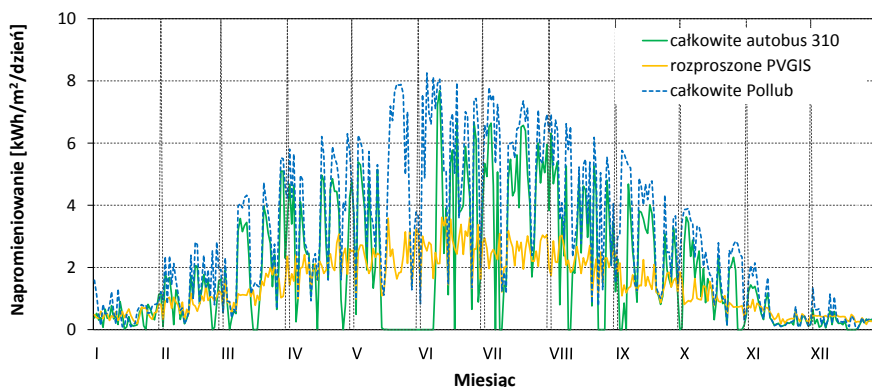
Średnia temperatura dobowa, słoneczna i ogniwa w ciągu roku wynosi odpowiednio 9,2°C, 10,5°C i 17,5°C. Średnio temperatura ogniwa jest wyższa od temperatury otoczenia o około 66%. Najniższe temperatury zanotowano pod koniec stycznia. Ze względu na niską wartość natężenie promieniowania słonecznego o średniej wartości 100 W/m² temperatura ogniwa wzrosła o 66%. Najwyższe temperatury zanotowano na początku sierpnia: 24,5°C (dobowa), 26,5°C (dzienna) i 40,6°C (ogniwa). W tym czasie średnia dzienna wartość natężenia promieniowania słonecznego wyniosła 461 W/m², co wpłynęło na 53-procentowe

zwiększenie temperatury pracy ogniwa PV. Największe różnice pomiędzy średnią temperaturą ogniwa a otoczenia (słoneczna) zanotowano na początku czerwca. Różnica wynosiła 16°C i bezpośredni wpływ na nią miała najwyższa wartość średniego, dziennego natężenia promieniowania słonecznego zanotowana w całym roku i wynosząca 515 W/m^2 .

Dla porównania na rycinie 8.5 przedstawiono przebieg średnich miesięcznych temperatur w typowych latach meteorologicznych wg PVGIS (ciągi 10-letnie) oraz ISO (ciąg 30-letni). Średnia wartość z lat PVGIS jest mniejsza od ISO od maja do grudnia. W pozostałych miesiącach temperatury wg ISO i średnia PVGIS pokrywają się ze sobą. W tym zestawieniu również średnia temperatura z poszczególnych lat jest mniejsza niż średnia z 30 lat wyznaczona metodą ISO, która wynosi $7,73^{\circ}\text{C}$, a w przypadku PVGIS najniższa wartość – $8,08^{\circ}\text{C}$ – była w roku 2010.

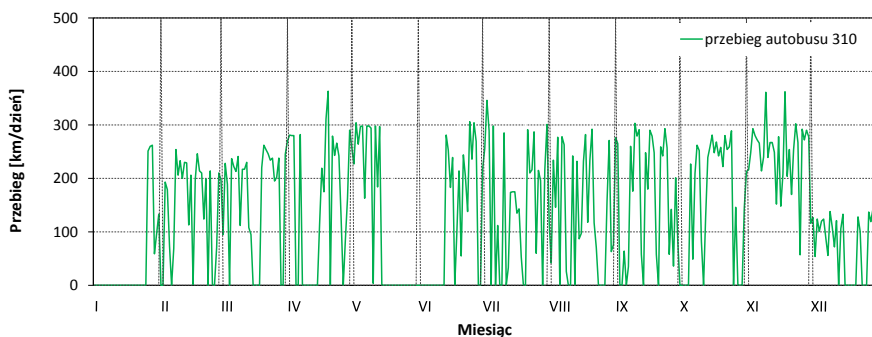
8.4. Zakłócenia w oświetleniu i ich wpływ na model

Na rycinach 8.6, 8.9, 8.10 i 8.12 przedstawiono kolejno przebieg średniej sumy dziennej napromieniowania całkowitego i rozproszonego na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dachach poszczególnych autobusów (o numerach 310, 311, 332, 333) w roku 2014. Autobus 310 przez połowę maja i część czerwca był wyłączony z użytkowania, co miało wpływ na sumaryczną roczną ilość otrzymanej całkowitej energii słonecznej wynoszącej 685 kWh/m^2 . W tym okresie nie rejestrowano napromieniowania oraz w wymienionych miesiącach dostępne napromieniowanie osiągało maksymalne wartości. Brak rejestracji parametrów autobusu pokrywa się z jego wyłączeniem z ruchu. Na wykresie przebiegu oraz napromieniowania wartości wynoszą zero. W ponad 68% w stosunku rocznym dach autobusu otrzymuje energię słoneczną, która dociera do nieruchomego budynku. Dienne wartości napromieniowania z 1 m^2 powierzchni dachu autobusu są bliskie wartościom osiąganym na nieruchomym i niezacienianym obiekcie takim jak dach budynku z systemem pomiaru napromieniowania.

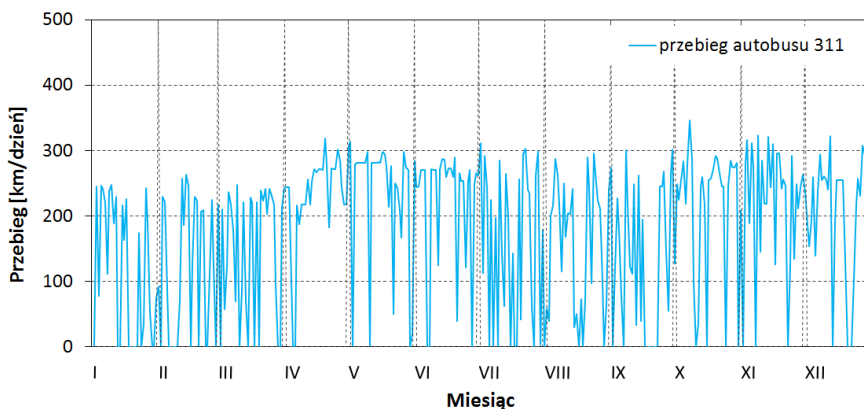


Ryc. 8.6. Przebieg średniej sumy dziennej całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię poziomą dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dach autobusu 310 w roku 2014

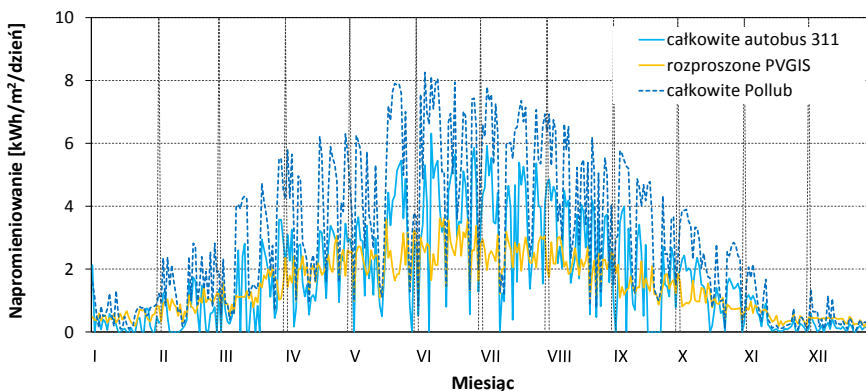
Na rycinie 8.7 przedstawiono średnią sumę dzienną przebiegu analizowanego pojazdu o numerze 310 w ciągu roku, który sumarycznie wyniósł 48 502 km (średnia z roku to 132 km/dzień). Średnio autobus od stycznia do maja przejechał 172 km/dzień, po wyłączeniu z ruchu wartość ta wyniosła 185 km/dzień, a w grudniu tylko 89 km/dzień. Maksymalne przebiegi dzienne wynosiły 350 km. Postoje lub niski przebieg pokrywają się z maksymalnymi wartościami napromieniowania docierającymi do autobusu. Jednocześnie wartości napromieniowania całkowitego na dachu budynku i dachu pojazdu osiągały przybliżone wartości. Po podzieleniu wartości napromieniowania przez liczbę kilometrów przejechanych przez autobus otrzymano energię słoneczną przypadającą na odcinek przejechanej drogi. W przypadku autobusu 310 wynosi ona 14,1 (Wh/m²)/km.



Ryc. 8.7. Średnia suma dzienna przebiegu autobusu 310 w roku 2014



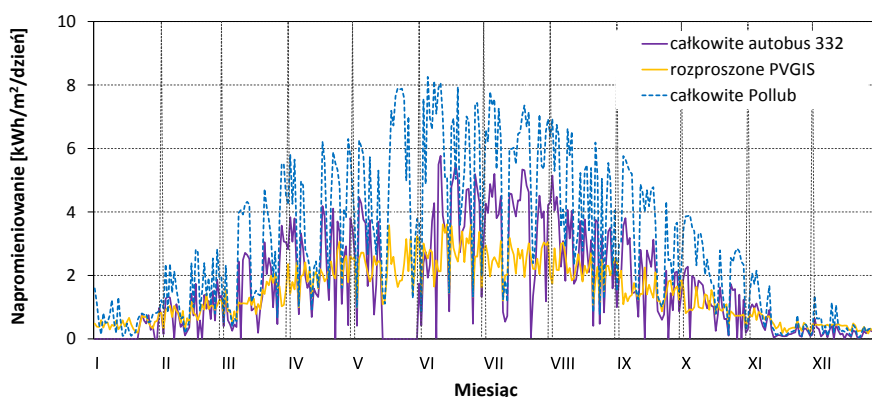
Ryc. 8.8. Średnia suma dzienna przebiegu autobusu 311 w roku 2014



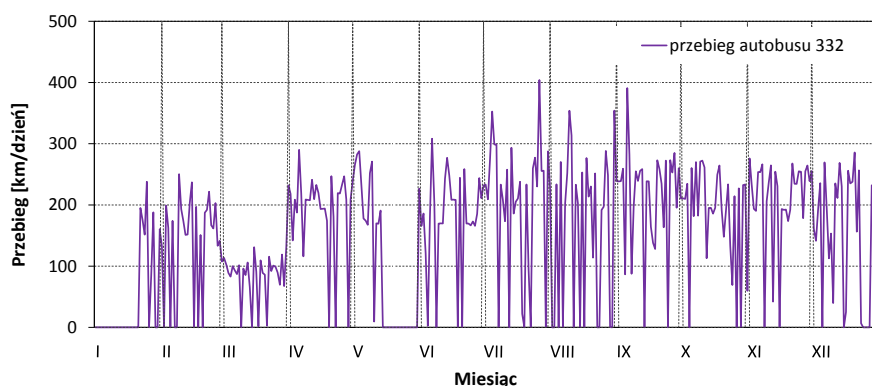
Ryc. 8.9. Przebieg średniej sumy dziennej całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dach autobusu 311 w roku 2014

Autobus 311 był najbardziej eksploatowanym pojazdem (ryc. 8.8). W ciągu roku przebieg pojazdu wyniósł 64 861 km (średnio 177 km/dzień). We wszystkich analizowanych miesiącach maksymalne dzienne przebiegi były równomierne i wynosiły około 250 km. Autobusy były eksploatowane od godziny 5:00 do 23:00, co pokrywa się z dwiema 8-godzinnymi zmianami czasu pracy kierowców. Bardzo dużo wyłączeń z ruchu było w miesiącach zimowych oraz w sierpniu. W okresach tych miało to wpływ na równomierny rozkład różnicy pomiędzy napromieniowaniem całkowitym a napromieniowaniem docierającym do autobusu 311 (ryc. 8.9). W efekcie sumaryczna wartość napromieniowania

wyniosła $639 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$, co stanowiło 58% napromieniowania całkowitego docierającego do płaskiej powierzchni budynku. W miesiącach jesienno-zimowych, zaczynając od połowy listopada do końca stycznia, napromieniowanie rozproszone na nieruchomym obiekcie było większe niż na jeżdżącym autobusie. W pozostałych miesiącach, kiedy autobus poruszał się, zawsze odbierał wartość promieniowania większą od wartości promieniowania rozproszonego na powierzchni budynku (538 kWh/m^2). Analizowany autobus otrzymał średnio w ciągu roku $9,9 (\text{Wh/m}^2)/\text{km}$. Wartość ta uwzględniała również postoje autobusu.

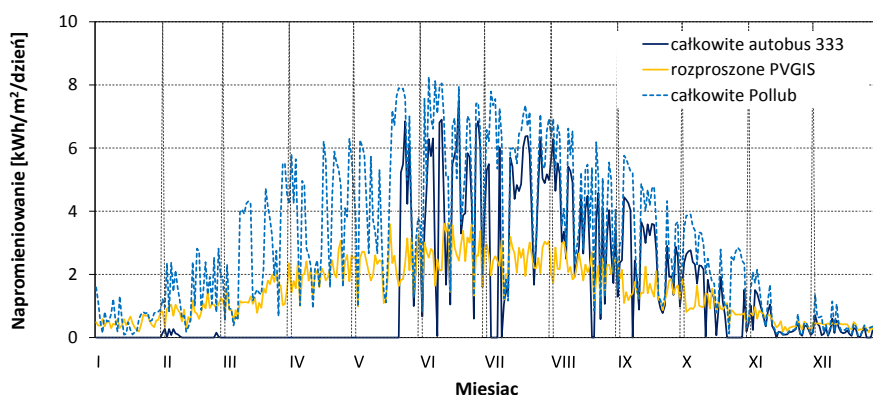


Ryc. 8.10. Przebieg średniej sumy dziennej całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dach autobusu 332 w roku 2014

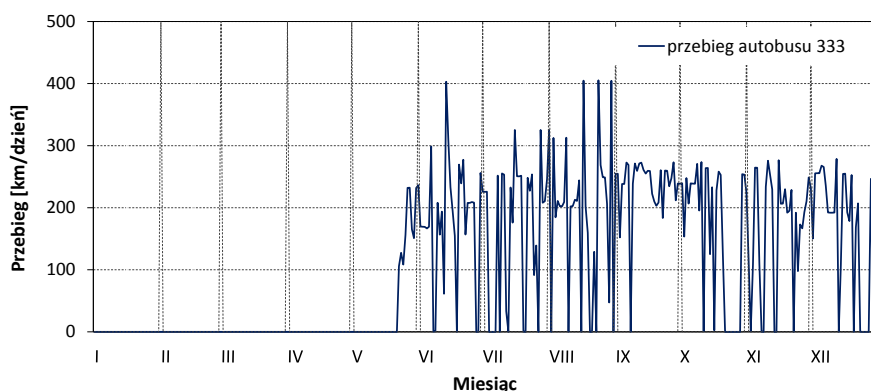


Ryc. 8.11. Średnia suma dzienna przebiegu autobusu 332 w roku 2014

Na rycinie 8.11 przedstawiono średnią sumę dzienną przebiegu autobusu 332, który sumarycznie przejechał w ciągu roku 55 744 km. Autobus był wyłączony przez połowę stycznia oraz połowę maja. W pozostałych miesiącach był okresowo wyłączany z eksploatacji. Autobus dodatkowo był eksploatowany na długich trasach, o czym świadczą przebiegi powyżej 300 km. Sumaryczna wartość napromieniowania wyniosła 597 kWh/m²/rok, co stanowiło 54% napromieniowania całkowitego docierającego do płaskiej powierzchni budynku. Na przejechany kilometr autobus otrzymał napromieniowanie o wartości 10,7 Wh/km.



Ryc. 8.12. Przebieg średniej sumy dziennej całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dach autobusu 333 w roku 2014



Ryc. 8.13. Średnia suma dzienna przebiegu autobusu 333 w roku 2014

Na rycinie 8.13 przedstawiono średnią sumę dzienną przebiegu autobusu 333, którego eksploatację rejestrowano od połowy maja. On również był eksploatowany na długich trasach. W rejestrowanym okresie autobus przejechał 39 064 km, co daje średnią wartość 176 km/dzień. Przy takim poziomie eksploatacji w ciągu roku pojazd przejechałby 64 240 km. W drugiej połowie września autobus był eksploatowany każdego dnia. W ciągu analizowanego okresu na dach poruszającego się autobusu dotarło napromieniowanie całkowite o wartości 527 kWh/m², stanowiąc tylko 48% napromieniowania całkowitego będącego do dyspozycji w ciągu roku na analizowanej szerokości geograficznej. Zredukowany udział jest efektem braku eksploatacji autobusu od stycznia do połowy maja. Analizując ilość napromieniowania docierającego do dachu autobusu tylko w okresie rejestracji (maj–grudzień), udział wynosi 71%, ponieważ napromieniowanie docierające do dachu budynku w tym okresie wyniosło 737 kWh/m². Autobus pomimo braku rejestracji do połowy maja otrzymał napromieniowanie o wartości 13,5 Wh/m², przypadające na kilometr przejechanej drogi.

8.5. Wpływ prędkości jazdy

Analizując średnią prędkość autobusu, rozróżnia się 3 różne prędkości uszeregowane od największej, takie jak: techniczna, komunikacyjna i eksploatacyjna. Prędkość techniczna określona jest wzorem:

$$V_t = \frac{D_x}{t_j} \quad (8.2)$$

gdzie:

- V_t – prędkość techniczna [km/s],
- D_x – przebieg w danym autobusie [km],
- t_j – czas jazdy z prędkością >0 [s].

Prędkość ta jest stosunkiem długości kursu w kilometrach (przebieg) w ciągu dnia, miesiąca lub roku oraz czasu w analizowanym okresie, w którym autobus porusza się z prędkością większą od 0, a więc bez uwzględniania czasu postojów na przystankach. Na prędkość tę wpływają warunki panujące w ruchu miejskim.

Prędkość komunikacyjna uwzględnia postoje na przystankach i jest stosunkiem przebiegu autobusu w danym okresie oraz czasu wykonania kursu.

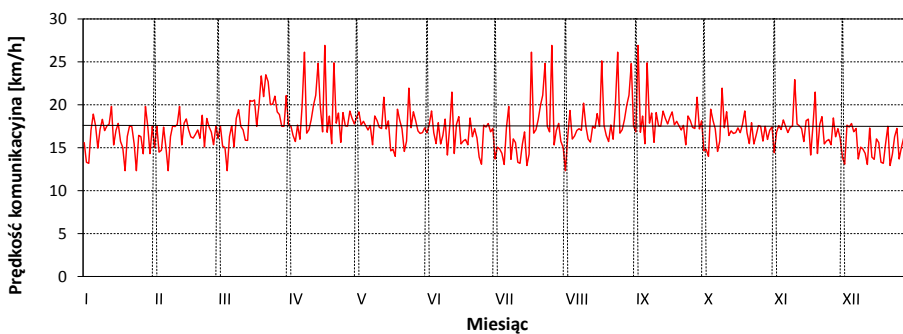
W założeniu silnik spalinowy jest cały czas uruchomiony. Przedstawiono to w postaci zależności:

$$V_k = \frac{D_x}{t_k} \quad (8.3)$$

gdzie:

- V_k – prędkość komunikacyjna [km/s],
- D_x – przebieg w danym autobusie [km],
- t_k – czas wykonania kursu bez przerw między kursami [s].

Założenia prędkości komunikacyjnej są najbardziej zbliżone do modelu Ideal2, w którym podstawowym kryterium wyboru punktu spośród 4 autobusów do analizowanego szeregu czasowego była właśnie maksymalna wartość przebiegu. Na rycinie 8.14 przedstawiono przebieg dzienny średniej prędkości komunikacyjnej w ciągu roku uzyskany z 4 autobusów miejskich, biorąc pod uwagę liczbę przejechanych kilometrów oraz czas pracy silnika spalinowego. Jednym z kryteriów jej wyznaczenia była analiza stanów pracy autobusu, w których silnik spalinowy był uruchomiony (prędkość obrotowa wału korbowego była większa od 400 obr./min). Średnia prędkość komunikacyjna w ciągu roku wynosiła 17,3 km/h. Jej wartość minimalna to 12 km/h, a maksymalna niespełna 27 km/h, co wiąże się z dużymi przebiegami w okresach wakacyjnych. Przebieg tej prędkości posłużył do analizy chłodzenia systemu fotowoltaicznego zamontowanego na dachu podczas jazdy.



Ryc. 8.14. Przebieg dzienny średniej prędkości komunikacyjnej w autobusach na terenie miasta Lublin na podstawie zarejestrowanego maksymalnego przebiegu w modelu Ideal2 oraz czasu pracy silnika spalinowego

Prędkość komunikacyjną można również wyznaczyć z cykli jezdnych modelujących sposób eksploatacji autobusu i odzwierciedlających w czasie profil prędkości pojazdu. W tabeli 8.1 przedstawiono cykle jezdne autobusów miejskich na podstawie [88], symulujące przejazd autobusu na pojedynczej trasie z uwzględnieniem postojów na przystankach od pętli początkowej do końcowej. Średnia prędkość z poszczególnych cykli wynosi 18,3 km/h. Europejski cykl jazdy autobusu to Braunschweig City, w którym średnia prędkość przejazdu wynosi 22,6 km/h.

Tab. 8.1. Zestawienie autobusowych cykli jezdnych

Cykl	Dystans	Czas cyklu	Postój	Udział fazy postój	Średnia prędkość
	[m]	[s]	[s]	[%]	[km/h]
Ideal2	245 000	50 982	–	–	17,3
Braunschweig City	10 900	1740	288	16,55	22,6
New York Bus	996	600	328	54,67	6,0
Manhattan Bus	3333	1089	295	27,09	11,0
Orange County Bus (Los Angeles)	10 530	1909	317	16,61	19,9
UG214 Bus10: suburban control	6395	886	17	1,92	26,0
Millbrook Westminster London Bus: outer London	6474	1381	307	22,23	16,9
Millbrook Westminster London Bus: inner London	2509	902	281	31,15	10,0
TNO Bus (Holandia)	5248	898	192	21,38	21,0
Transit Coach Operating Duty – All	22633	2830	376	13,29	28,8
Transit Coach Operating Duty – CBD	3295	560	17	3,04	21,2
Średnia				20,79	18,3

W pierwszym wierszu tabeli 8.1 przedstawiono podstawowe parametry cyklu Ideal2 wyznaczonego eksperymentalnie na podstawie maksymalnej wartości przebiegu 4 autobusów miejskich i odpowiadającemu czasowi pracy silnika. Autobus dziennie przejeżdża średnio 245 km w czasie ponad 14 godzin pracy, ze średnią prędkością komunikacyjną 17,3 km/h. Pomiary dokonywane w polskich miastach pokazują, że dzisiaj prędkość komunikacyjna to około 20 km/h (jeszcze 5 lat temu wynosiła około 22–25 km/h). W Lublinie prędkość komunikacyjna wyniosła 20,7 km/h, w Krakowie przyjmuje się 20,3 km/h.

Przeciętny przebieg autobusu miejskiego w Polsce w 2021 roku to 71 182 km. W województwie lubelskim wynosił 68 414 km. Największy średni roczny przebieg autobusu miejskiego osiągnięto w województwie kujawsko-pomorskim: 76 298 km, a najniższy w województwie warmińsko-mazurskim – 48 577 km. Oznacza to, że średnio w Polsce autobus miejski przejeżdża dziennie dystans z zakresu 133–209 km, przy średniej krajowej 193 km/dzień [94].

Oczywiście prędkość eksploatacyjna jest dużo mniejsza, gdyż uwzględnia czas na wszystkie czynności towarzyszące (postoje na przystankach, pętlach końcowych, zajezdniach i w czasie napraw) i jest stosunkiem przebiegu autobusu oraz sumarycznego, potencjalnego czasu na wykonanie kursu (w Lublinie jest to przedział pomiędzy 5:00 a 23:00 i wynosi 18 godzin). Czas ten sumuje się do obliczeń, nawet w okresach, kiedy autobus nie wyjeżdża na trasę.

Prędkość eksploatacyjną autobusu miejskiego można przedstawić w postaci zależności:

$$V_e = \frac{D_x}{t_e} \quad (8.4)$$

gdzie:

- V_e – prędkość eksploatacyjna [km/s],
- D_x – przebieg w danym autobusie [km],
- t_e – potencjalny czas całkowity na wykonanie kursu [s].

Nie wszystkie autobusy będące w taborze danego przewoźnika wykonują operacje transportowe. Udział autobusów w ruchu w stosunku do całkowitego taboru w województwie lubelskim wyniósł 74%. Największy udział poruszających się autobusów jest w województwie dolnośląskim (91%), najmniejszy w województwie lubelskim, przy średniej krajowej 80% [94]. W modelu Ideal2 średnia prędkość eksploatacyjna wyniosła 13,6 km/h. Dla badanych autobusów o oznaczeniu 310, 311, 332, 333 prędkość eksploatacyjna wyniosła odpowiednio 7,38 km/h, 9,87 km/h, 8,48 km/h i 5,94 km/h.

Wydajność wszystkich typów modułów PV zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury modułu. W pracy [227] autorzy zaproponowali laboratoryjną metodologię badawczą umożliwiającą wyznaczenie rzeczywistej temperatury pracy modułu PV zintegrowanego z nadwoziem pojazdu, gdzie tył modułu był izolowany i zachodził jedynie efekt wymiany ciepła na skutek radiacji i konwekcji. Wyniki laboratoryjne porównano z wynikami uzyskanymi z nadwozia pojazdu. Wyznaczono nominalną temperaturę pracy modułu polikrzemowego z izolowanym tyłem w maju, w warunkach bezchmurnego nieba, jako

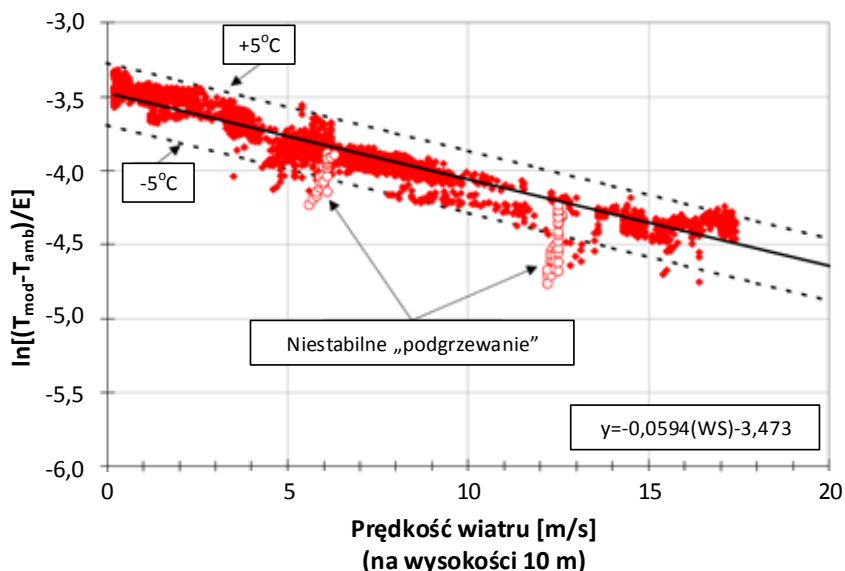
wartość średnią równą 51°C . Stosując modelowe podejście autora [145] do analizy modułu PV z izolowanym tyłem, rzeczywista nominalna temperatura pracy modułu fotowoltaicznego mieści się w zakresie $62\text{--}74^{\circ}\text{C}$ i jest zależna od temperatury otoczenia. W dni gorące temperatura pracy jest mniejsza niż w dni chłodne, co wynika ze zmniejszenia efektu wymiany ciepła za pomocą radiacji z 4 potęgą temperatury (moduł chłodzi się lepiej przy wyższej temperaturze pracy). Model nie brał pod uwagę prędkości wiatru i zakładał ją na poziomie 1 m/s .

Autorzy pracy [18] zaproponowali model termiczny panelu fotowoltaicznego weryfikujący jego zachowanie termiczne przy różnych prędkościach wiatru. Model został zweryfikowany eksperymentalnie w warunkach rzeczywistych dla panelu fotowoltaicznego w ramie aluminiowej i z szybą zamocowanego na konstrukcji otwartej. Danymi wejściowymi były właściwości termiczne poszczególnych warstw panelu PV, współczynniki wymiany ciepła przez radiację oraz wymuszoną i swobodną konwekcję. Przedstawiony model wykorzystuje inne zależności przedstawione w literaturze, między innymi eksperymentalnie wyznaczoną zależność temperatury pracy ogniwa od warunków otoczenia opracowaną przez Sandia National Laboratories [122].

Podsumowując, w literaturze brakuje modelu termicznego, który przewidywałby temperaturę modułu PV dla instalacji w pojeździe. W tym celu w pracy do analizy temperatury pracy ogniwa wybrano empiryczny model termiczny opracowany przez Sandia Lab do prognozowania temperatury ogniw PV na podstawie temperatury otoczenia oraz prędkości powietrza omywającego moduł fotowoltaiczny. Badając tysiące pomiarów temperatury zarejestrowanych w ciągu kilku różnych dni, wyznaczono współczynniki empiryczne dla każdej konfiguracji montażowej i typu modułu.

Na rycinie 8.15 przedstawiono przykładową wyznaczoną doświadczalnie zależność temperatury powierzchni tylnej płaskiego modułu PV z podwójną szybą, zamontowanego na ramie, jako funkcji napromieniowania słonecznego, temperatury otoczenia i prędkości wiatru. Dopasowanie regresji liniowej do danych dostarcza współczynników (a, b) dla modelu termicznego. Dokładność tego modelu mieści się w zakresie $\pm 5^{\circ}\text{C}$, co odpowiada mniej niż 3% wpływu na moc modułu PV [122]. W tabeli 8.2 przedstawiono podsumowanie wyznaczania empirycznych współczynników do modelu dla pozostałych typów modułów oraz sposobów ich montażu. Dzięki otwartej konfiguracji ramy powietrze może swobodnie cyrkulować wokół modułu. Moduł zamontowany na ramie nad powierzchnią dachu z niewielkim luzem pomiędzy powierzchnią a tyłem modułu pozwala na przepływ mniejszej ilości powietrza przez moduł.

Izolowany tył oznacza, że nie ma luzu i swobodnej cyrkulacji powietrza za modułem, dlatego „ $\Delta T = 0$ ” dla tej opcji, ponieważ nie ma różnicy temperatur pomiędzy tylną częścią modułu a jego wnętrzem. W takim przypadku temperatura wnętrza tyłu modułu i ogniwo mają identyczne temperatury.



Ryc. 8.15. Wyznaczona doświadczalnie zależność temperatury powierzchni tylnej płaskiego modułu PV z podwójną szybą, zamontowanego na ramie, jako funkcji napromieniowania słonecznego, temperatury otoczenia i prędkości wiatru. Dopasowanie regresji liniowej do danych dostarcza współczynników (a, b) do modelu termicznego. Opracowanie własne na podstawie [122]

Tab. 8.2. Empirycznie wyznaczone współczynniki używane do przewidywania temperatury powierzchni tylnej modułu jako funkcji napromieniowania, temperatury otoczenia i prędkości komunikacyjnej. Prędkość wiatru była mierzona na standardowej wysokości meteorologicznej 10 metrów. Opracowanie własne na podstawie [122].

Typ modułu	Montaż	a	b	ΔT [°C]
szkło/ogniwo krzemowe/szkło	Otwarta rama	-3,47	-0,0594	3
szkło/ogniwo krzemowe/szkło	Nad powierzchnią dachu	-2,98	-0,0471	1
szkło/ogniwo krzemowe/płyta polimerowa	Otwarta rama	-3,56	-0,0750	3
szkło/ogniwo krzemowe/płyta polimerowa	Izolowany tył	-2,81	-0,0455	0
polimer/ogniwo cienkowarstwowe/stal	Otwarta rama	-3,58	-0,113	3
22X liniowy koncentrator	Tracker	-3,23	-0,130	13

Najbardziej zbliżonym typem modułu fotowoltaicznego w instalacji autobusowej jest moduł, w którym ogniwo krzemowe położone jest na izolowanej płycie polimerowej i jest pokryte szkłem. Półelastyczne moduły fotowoltaiczne są przyklejane do podłoża dwustronną taśmą izolacyjną na bazie pianki, która ma małą wartość współczynnika przewodzenia cieplnego, stanowiąc izolację i nie pozwalając na wymianę ciepła pomiędzy stalowym dachem autobusu a modułem fotowoltaicznym. W warunkach rzeczywistych moduł półelastyczny nie jest pokryty szkłem, tylko przezroczystą folią Folie ETFE, której wartość współczynnika przewodzenia wynosi 0,238 W/m²*K [121].

Temperaturę modułu PV zamontowanego na autobusie miejskim na powierzchni tylnej można obliczyć za pomocą równania wg modelu Sandia:

$$T_{back} = E_{Ideal} \cdot (e^{a+b \cdot V_k}) + T_{air} \quad (8.5)$$

gdzie:

- T_{back} – temperatura modułu na powierzchni tylnej [°C],
- E_{Ideal} – natężenie promieniowania słonecznego w modelu Ideal [W/m²],
- a – współczynnik empiryczny określający górną granicę temperatury modułu przy małej prędkości wiatru i z dużą wartością napromieniowania,
- b – współczynnik empiryczny określający szybkość spadku temperatury modułu w miarę wzrostu prędkości wiatru,
- V_k – prędkość komunikacyjna [m/s],
- T_{air} – temperatura otoczenia [°C].

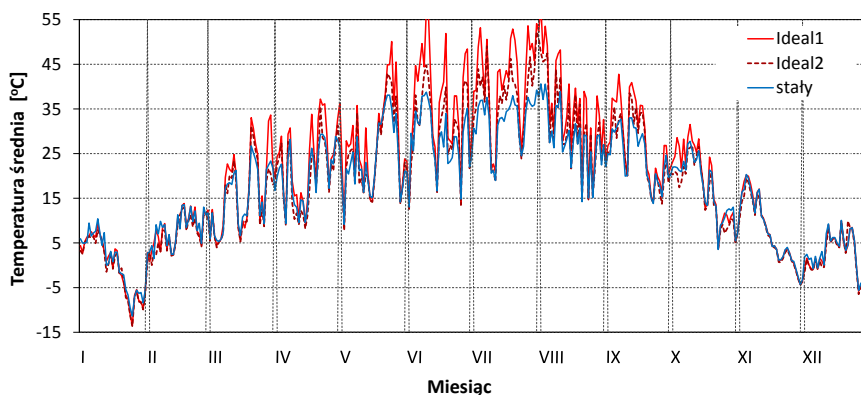
Za pomocą równania odniesiono temperaturę ogniwa wewnątrz modułu (T_{cell}) do temperatury modułu na jego powierzchni tylnej, stosując równanie:

$$T_{cell} = T_{back} + \frac{E_{Ideal}}{E_{STC}} \cdot \Delta T \quad (8.6)$$

gdzie:

- T_{cell} – temperatura ogniwa modułu [°C],
- T_{back} – temperatura modułu na powierzchni tylnej [°C],
- E_{Ideal} – natężenie promieniowania słonecznego w modelu Ideal [W/m²],
- E_{STC} – natężenie promieniowania słonecznego w warunkach STC [1000 W/m²],

ΔT – różnica temperatury pomiędzy powierzchnią tylną modułu a ogniwem przy natężeniu promieniowania słonecznego [1000 W/m^2].



Ryc. 8.16. Przebieg średniej temperatury ogniw w kolejnych dniach roku wyznaczonej dla modułu sztywnego (stały) na dachu budynku oraz dla modułów elastycznych na autobusach w modelu Ideal1 (wybór największej wartości napromieniowania spośród 4 autobusów) i Ideal2 (zdefiniowany maksymalną wartością przebiegu spośród 4 autobusów i towarzyszącej wartości napromieniowania) na podstawie zarejestrowanej prędkości komunikacyjnej, temperatury otoczenia i napromieniowania

Na rycinie 8.16 przedstawiono przebieg średniej temperatury ogniw w kolejnych dniach roku wyznaczoną dla modułu sztywnego na dachu budynku oraz dla modułów elastycznych na autobusach w modelu Ideal1 i Ideal2. Temperatura ogniw na autobusach została wyznaczona na podstawie zarejestrowanej prędkości komunikacyjnej, temperatury otoczenia i napromieniowania, wykorzystując zmodyfikowany model Sandia (wzór 5.11). Temperatura ogniw sztywnego panelu pochodzi z obliczeń wg wzoru 5.7. Wykorzystany szereg czasowy napromieniowania w modelu Ideal1 powstał w oparciu o kryterium wyboru największej wartości napromieniowania spośród 4 autobusów. Z kolei szereg czasowy w modelu Ideal2 zdefiniowano maksymalną wartością przebiegu spośród 4 autobusów i towarzyszącej wartości napromieniowania. Średnia wartość temperatury dla modułu sztywnego, w modelu Ideal1 i Ideal2, wynosi odpowiednio $17,59^{\circ}\text{C}$, $20,55^{\circ}\text{C}$ i $18,08^{\circ}\text{C}$. Najwyższe temperatury są rejestrowane w modelu Ideal1, w którym ogniwo pracuje przy dużym napromieniowaniu (średnio o około 20% mniejszym niż moduł sztywny) w niekorzystnych warunkach odprowadzania ciepła (izolowany tył). Mniejsze temperatury występują w ogniwach w modelu Ideal2, gdzie jest jeszcze mniejsze napromieniowanie i dochodzi efekt chłodzenia modułu podczas jazdy.

Najniższe temperatury w ciągu roku występują w ogniwie umieszczonym na dachu budynku na otwartej ramie, bez izolacji tyłu.

8.6. Wyznaczanie strumienia energii dla modułów fotowoltaicznych

Sprawność modułu PV jest definiowana jako całkowita moc wytworzona na jednostkę powierzchni (m^2) w warunkach STC. Sprawność modułu PV powinna być również wysoka, aby zapewnić maksymalną moc wyjściową dla danych warunków pogodowych i danej powierzchni modułu.

Moduły fotowoltaiczne pracują zwykle w temperaturze 55–75°C, co wywołuje spadek wytwarzanej mocy o 12–25% wartości znamionowej. Przy wysokich temperaturach zakłada się zmniejszenie sprawności o 0,5% na 1°C, zatem jeżeli temperatura ogniwa podwyższy się z 25°C do 55°C, sprawność zmniejszy się o około 15%. Wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się sprawność ogniw.

Uwzględniając wartość temperatury pracy ogniwa fotowoltaicznego, rzeczywista sprawność danego modułu fotowoltaicznego jest określona przez:

$$\eta_m = \eta_{m,STC} \cdot [1 - P_{MPP} \cdot (T_{cell} - T_{STC})] \quad (8.7)$$

gdzie:

η_m – sprawność modułu,

$\eta_{m,STC}$ – katalogowa sprawność modułu w warunkach STC,

P_{MPP} – temperaturowy współczynnik mocy [%/°C],

T_{cell} – temperatura ogniwa [°C],

T_{STC} – temperatura w warunkach STC [°C].

Sprawność danego modułu fotowoltaicznego w warunkach STC określa się za pomocą wzoru:

$$\eta_{m,STC} = \frac{P_{m,STC}}{E_{STC} \cdot A_m} \quad (8.8)$$

gdzie:

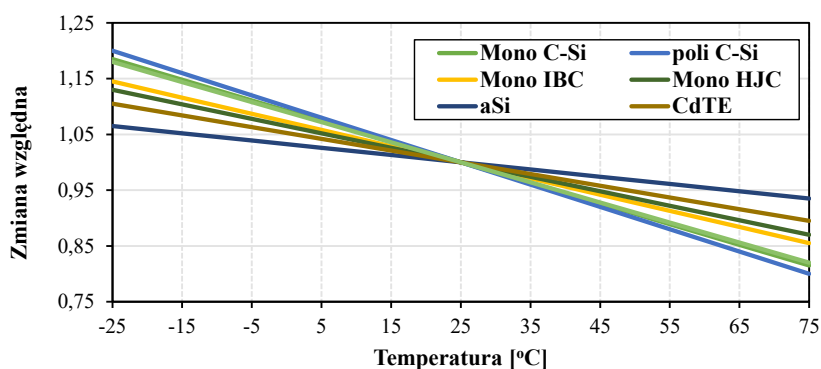
$\eta_{m,STC}$ – sprawność modułu w warunkach STC,

$P_{m,STC}$ – moc produkowana przez jeden moduł w warunkach STC,

E_{STC} – natężenie promieniowania słonecznego w warunkach STC [W/m^2],

A_m – powierzchnia jednego modułu [m^2].

Temperaturowy współczynnik mocy maksymalnej P_{mpp} pozwala określić zmianę względną mocy znamionowej ogniw/modułów fotowoltaicznych i jest wyrażony w jednostce procentowej spadku mocy w zależności od wzrostu temperatury i wyrażony w % na stopień wzrostu temperatury ($-\%/^{\circ}\text{C}$). Wzrost temperatury w stosunku do warunków STC (25°C) powoduje spadek wydajności wszystkich typów modułów PV, przy czym niższy P_{mpp} oznacza mniejszy spadek. Na rycinie 8.17 przedstawiono zmianę względną znamionowej mocy poszczególnych technologii modułów fotowoltaicznych w zależności od temperatury. Największe straty mocy występują w modułach polikrystalicznych, a najmniejsze na bazie tellurku kadmu oraz amorficznych. W warunkach zimowych jest odwrotnie – moduły polikrystaliczne mają większą moc. Przy wysokim poziomie napromieniania, gdy moduły pracują najwydajniej, dla ogniw z krzemu krystalicznego spadek mocy jest największy. Z tego względu moduły amorficzne o stosunkowo niskiej sprawności są atrakcyjne, gdy mają pracować w wysokich temperaturach, a zajmowana powierzchnia nie ma pierwszorzędного znaczenia.

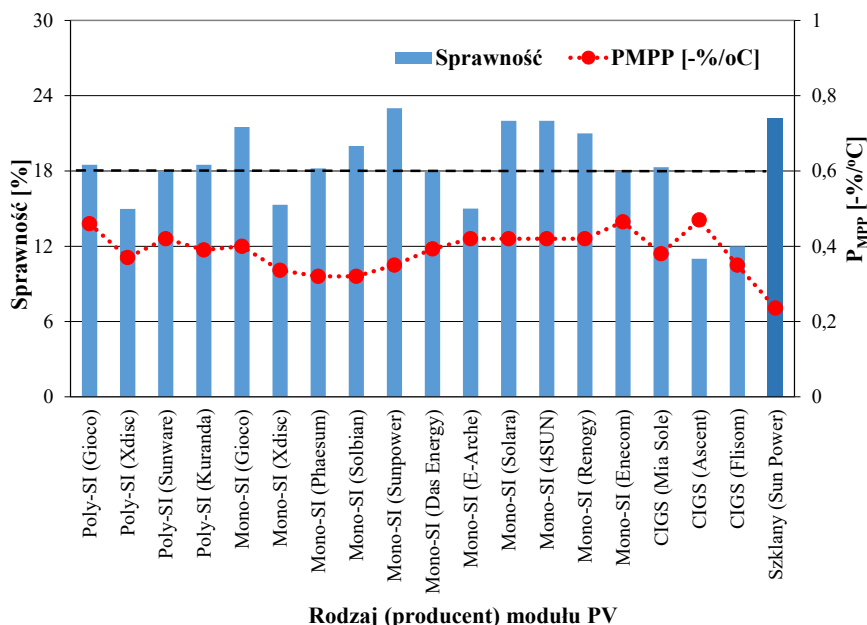


Ryc. 8.17. Zmiana względna mocy znamionowej poszczególnych technologii modułów fotowoltaicznych w funkcji temperatury. Opracowanie własne na podstawie [79], [50]

W ogniwie słonecznym parametrem, na który największy wpływ ma wzrost temperatury, jest napięcie obwodu otwartego V_{oc} . Zjawisko to można zminimalizować poprzez zapewnienie chłodzenia powierzchni modułu. Zastosowanie pomiaru termowizyjnego pozwala na wykrycie niesprawnych ogniw w modułach i jest

uznawane za kluczowy wskaźnik jakości próbki. Jest to szybka i efektywna metoda do lokalizacji wad, które mogą powodować straty mocy modułu fotowoltaicznego.

Zacienienie i pęknięcia w ogniwach na obrazie w podczerwieni są widoczne jako gorące punkty lub wielokątna mozaika. Zwiększenie temperatury ogniwa lub jego części wskazuje, że ogniwo jest zacienione lub uszkodzone. Obrazy w podczerwieni zarejestrowane pod obciążeniem, bez obciążenia i w stanie zwarcia można porównywać. Porównanie obrazów w podczerwieni zarejestrowanych z przodu i z tyłu modułu także może dostarczać wartościowych informacji.



Ryc. 8.18. Sprawność i temperaturowy współczynnik mocy maksymalnej dla poszczególnych półelastycznych modułów fotowoltaicznych

Rycina 8.18 przedstawia sprawność i temperaturowy współczynnik mocy maksymalnej P_{MPP} dla poszczególnych półelastycznych modułów fotowoltaicznych. Sprawność waha się od niskiej wartości 11% dla modułów typu CIGS, poprzez 18% w przypadku modułów polikrystalicznych, aż do wysokosprawnych modułów monokrystalicznych, w których sprawność przemiany energii słonecznej na energię elektryczną wynosi ponad 21%. Średnio wszystkie półelastyczne moduły fotowoltaiczne mają sprawność 18%.

Moc maksymalna najszybciej spada podczas wzrostu temperatury dla modułów polikrystalicznych firmy Gioco ($P_{mpp} = -0,46\%/^{\circ}\text{C}$), a najwolniej dla modułów monokrystalicznych firmy Phasum i Solbian ($P_{mpp} = -0,32\%/^{\circ}\text{C}$). Średnia wartość

temperaturowego współczynnika mocy maksymalnej dla analizowanych i dostępnych na rynku półelastycznych paneli fotowoltaicznych wynosi $-0,39\%/^{\circ}\text{C}$, co oznacza, że moduł fotowoltaiczny, który w warunkach optymalnych STC (25°C) ma moc maksymalną o wartości 100 W, przy temperaturze 40°C będzie miał moc o około 6% mniejszą, czyli 94 W. W przypadku pracy modułów w temperaturach niższych niż w STC moc maksymalna modułu wzrasta.

Sprawność poszczególnych modułów fotowoltaicznych różni się w warunkach rzeczywistych w stosunku do warunków laboratoryjnych STC. Autorzy pracy [37] przedstawili szczegółowe wyniki badań 4 technologii modułów fotowoltaicznych w warunkach rzeczywistych w południowej Hiszpanii. Wyniki badań potwierdziły, że sprawność modułów polikrystalicznych pc-SI spada wraz ze wzrostem temperatury i wartością napromieniowania. W przypadku technologii CdTe i a-SI spadek mocy jest dużo mniejszy. Mimo to sprawność modułów polikrystalicznych i tak nie spada do poziomu konkurencyjnych technologii.

Tab. 8.3. Średnie wartości parametrów poszczególnych rodzajów modułów fotowoltaicznych wykonanych w 4 technologiach

		Elastyczny			Sztywny
		Polikrystaliczny	Monokrystaliczny	CIGS	Szkłany
Parametr	Sprawność [%]	17,5	19,4	13,8	22,4
	Gęstość mocy [W/m^2]	147	163	99	226
	Powierzchnia systemu 1 kWp [m^2]	6,8	6,1	10,1	4,41
	Masa właściwa [W/kg]	35	51	49	21,05
	Masa systemu 1 kWp [kg]	28,6	19,6	20,4	47,5
	P_{MPP} [$-\%/^{\circ}\text{C}$]	0,42	0,37	0,4	0,29
	Moc systemu 1 kWp przy 75°C [W]	979	981,5	980	985,5

W tabeli 8.3 przedstawiono średnie wartości parametrów analizowanych modułów fotowoltaicznych wykonanych w 4 technologiach. Pierwsze 3 są to elastyczne panele fotowoltaiczne, a ostatni to panel szklany, który oferuje największą moc. Technologia budowy sztywnych paneli z uwagi na ich szerokie zastosowanie do budowy domowych i przemysłowych instalacji fotowoltaicznych stale jest rozwijana. Z kolei elastyczne panele fotowoltaiczne traktuje się niszowo ze względu na niski popyt, co skutkuje brakiem rozwiniętej technologii do ich budowy. Rozwijane panele sztywne mogą osiągnąć sprawność nawet 22,4%, a średnio panele elastyczne monokrystaliczne 19,4%. Najniższą sprawność uzyskują panele typu CIGS, która wynosi 13,8%.

Sprawność panelu jest ściśle związana z mocą przypadającą na powierzchnię systemu (gęstość mocy) oraz wynikowo na powierzchnię 1 kWp systemu. Najmniejszą powierzchnię będzie zajmowała 1 kWp panelu sztywnego ($4,4 \text{ m}^2$), o ile na ograniczonej i skomplikowanej powierzchni dachu pojazdu będzie miejsce do jego zabudowy. Z kolei zastosowanie elastycznego panelu monokrystalicznego do budowy 1 kWp mocy systemu fotowoltaicznego wymaga $6,1 \text{ m}^2$ powierzchni dachu.

Pojedyncze panele elastyczne nie mają dużej powierzchni. Średnio uzyskuje się około 150 W z powierzchni 1 m^2 panelu w przypadku paneli mono i poli. W przypadku CIGS wartość ta spada do 99 W/m^2 . Podyktowane jest to budową, która przeszkadza w transporcie paneli ze względu na ograniczony promień gięcia. Jednocześnie z paneli elastycznych można w łatwy sposób kształtować poszczególne rozmiary, które są wynikiem liczby i wymiarów stosowanych ogniw. W przypadku paneli sztywnych ze specjalną szybą oraz ramą jest to technologicznie trudniejsze. Panele elastyczne są o ponad połowę lżejsze w porównaniu do paneli sztywnych. System o mocy 1 kWp zbudowany z elastycznych paneli monokrystalicznych waży 19,6 kg, a zbudowany z paneli sztywnych 47,5 kg.

Panele sztywne są mniej wrażliwe na spadek mocy związany ze wzrostem temperatury. Moc 1 kWp spada o 1,5% w porównaniu do 2-procentowego spadku mocy dla paneli CIGS (tabela 8.3).

Można założyć, że wartość mocy szczytowej modułu fotowoltaicznego zmienia się liniowo wraz z temperaturą zgodnie z temperaturowym współczynnikiem mocy, P_{mpp} , który wynosi średnio $-0,37\%/^{\circ}\text{C}$ dla analizowanych modułów fotowoltaicznych (tab. 8.3) i jest podawany w specyfikacjach poszczególnych ogniw i modułów fotowoltaicznych. Moc modułu fotowoltaicznego spada wraz ze wzrostem temperatury. Współczynnik ten reprezentuje ułamkową zmianę wydajności modułu, ponieważ rzeczywista temperatura pracy ogniwa T_{cell} różni się od temperatury pracy ogniwa w warunkach laboratoryjnych T_{STC} . Wartość mocy szczytowej modułu fotowoltaicznego modeluje się jako zmieniającą się liniowo wartość wraz z natężeniem promieniowania. Jest to model dokładny pierwszego rzędu według [122] i jest postrzegany przez autorów jako odpowiedni kompromis pomiędzy złożonością i dokładnością. Jak wspomniano wcześniej, parametry systemu PV są testowane w laboratoryjnych warunkach STC. Przedstawione poniżej równanie opisuje moc elektryczną P_{PV} wytwarzaną przez system fotowoltaiczny podlegający zmianom temperatury i napromieniowania:

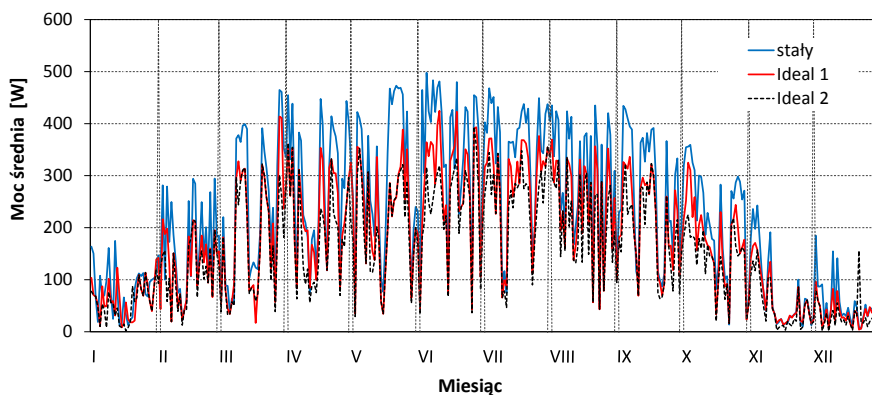
$$P_{PV} = P_{max} \cdot \frac{E}{E_{STC}} \cdot [1 + P_{MPP} \cdot (T_{cell} - T_{STC})] \quad (8.9)$$

gdzie:

- P_{PV} – moc systemu fotowoltaicznego,
- P_{max} – moc maksymalna modułu w warunkach STC,
- E – natężenie promieniowania słonecznego [W/m^2],
- E_{STC} – natężenie promieniowania słonecznego w warunkach STC [$1000 \text{ W}/\text{m}^2$],
- P_{MPP} – temperaturowy wskaźnik mocy [$\%/^{\circ}\text{C}$],
- T_{cell} – rzeczywista temperatura pracy ogniwa [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{STC} – znamionowa temperatura pracy ogniwa [$^{\circ}\text{C}$].

Moc wyjściowa systemu fotowoltaicznego spadnie, jeśli temperatura modułu wzrośnie. Moc znamionowa ogniw jest wartością mierzoną w temperaturze 25°C , temperatura ta jest używana jako odniesienie do oszacowania obniżenia mocy wyjściowej z powodu wzrostu temperatury. Na rycinie 8.19 przedstawiono przebieg średniej dziennej mocy instalacji fotowoltaicznej w kolejnych dniach w roku 2014, wyznaczonej w zależności od zarejestrowanego napromieniowania i obliczonej temperatury ogniwa. Obliczenie przeprowadzono dla instalacji o znamionowej mocy 1000 Wp w warunkach laboratoryjnych STC. W warunkach rzeczywistych średnia moc maksymalna instalacji w ciągu dnia w przypadku niezacienianego budynku wynosi tylko połowę, tj. 497 W. Jeżeli weźmiemy pod uwagę autobus poruszający się lub parkujący w rejonach maksymalnego nasłonecznienia (model Ideal1), moc maksymalna uwzględniająca temperaturę ogniwa będzie wynosić średnio 424 W. W modelu Ideal2 autobus porusza się w ciągu dnia, tak by uzyskać największe wartości przebiegów. Wówczas występuje największe zacienianie instalacji fotowoltaicznej i spadek wartości sumarycznie docierającego napromieniowania bezpośredniego. W efekcie moc maksymalna takiej instalacji wyniesie tylko 393 W. Średnio w ciągu roku system będzie miał moc 225 W, 178 W i 154 W – odpowiednio dla budynku oraz autobusu w modelu Ideal1 i Ideal2.

Zarówno system PV umieszczony na budynku, jak i na nieporuszającym się autobusie jest omywany powietrzem w czasie podmuchów wiatru. W powyższych obliczeniach uwzględniono dodatkową prędkość powietrza omywającego system fotowoltaiczny umieszczony na dachu autobusu, która jest wynikiem poruszania się autobusu.



Ryc. 8.19. Przebieg średniej mocy instalacji fotowoltaicznej w kolejnych dniach w roku 2014 wyznaczonej w zależności od zarejestrowanego natężenia promieniowania słonecznego i obliczonej temperatury ogniwa. Przyjęto bazową moc znamionową w warunkach STC (1000 W/m^2 , 25°C) instalacji 1000 Wp , a temperaturowy wskaźnik mocy $-0,37\%/^\circ\text{C}$. Szczywny (stały) – instalacja na budynku, Ideal1 – model poruszającej się, autobusowej instalacji PV z maksymalnymi wartościami napromieniowania, Ideal2 – model poruszającej się autobusowej instalacji PV z maksymalnymi wartościami przebiegu

9. Analiza energetyczna czterech autobusów miejskich

9.1. Selekcja autobusów do badań

Badania nad hybrydowym systemem generowania energii elektrycznej opartym na panelach PV w autobusach miejskich w Lublinie zostały przeprowadzone w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, aby określić rzeczywiste wartości wyjściowe: produkcji energii elektrycznej przez alternatory i system PV, jej zużycia przez odbiorniki elektryczne na pokładzie, a także energii zgromadzonej w akumulatorach autobusu.

Wszystkie obliczenia wykonano za pomocą programu NI DIAdem, opracowano też skrypt obliczeniowy w języku programowania Visual Basic, który automatycznie obliczał, odnosząc się do wszystkich plików, dane za cały rok. Badane parametry obejmowały wytworzoną energię elektryczną, czas pracy oraz zużycie paliwa eksploatacyjnego. Wyniki badań pozwoliły określić moc alternatorów, systemu PV i pokładowych urządzeń elektrycznych. Uzyskane wyniki porównano z całkowitym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Zarejestrowano również całkowity czas pracy silnika spalinowego, a więc czas pracy układu wytwarzania energii elektrycznej.

Badania przeprowadzono na 2 autobusach Mercedes Conecto LF (ryc. 9.1) będących na wyposażeniu MPK w Lublinie. Conecto LF to 12-metrowy, niskopodłogowy autobus o konstrukcji wykonanej ze spawanych profili zamkniętych ze stali nierdzewnej, mogący pomieścić 94 osoby (26 miejsc siedzących

i 68 stojących). Silnik umieszczono w zabudowie wieżowej, w lewym tylnym narożniku pojazdu. Jest to jednostka typu OM 926 LA, czyli stojący, rzędowy, 6-cylindrowy silnik wysokoprężny o mocy maksymalnej 205 kW i pojemności skokowej 7,23 dm³. Norma czystości spalin Euro IV jest osiągana dzięki zastosowaniu technologii BlueTec, czyli poprzez wtrysk płynu AdBlue w katalizatorze, pozwalający na dopalenie spalin. Napęd z silnika przenoszony jest za pomocą 4-biegowej automatycznej skrzyni biegów Voith 854.3 (przełożenia: 1-5,3 2-1,43 3-1,0 4-0,7), a następnie do mostu napędowego ZF AV-132 (przełożenie: 7,38) z przekładnią główną umieszczoną w zabudowie lewego nadkola. Autobus ma zawieszenie pneumatyczne, sterowane elektronicznie, z opcją przykłąku. Do badań wybrano autobus wyposażony w silnik wysokoprężny o oznaczeniu OM 926 LA, zużywający średnio około 39 dm³/100 km. Autobus ma dach o powierzchni 24 m².

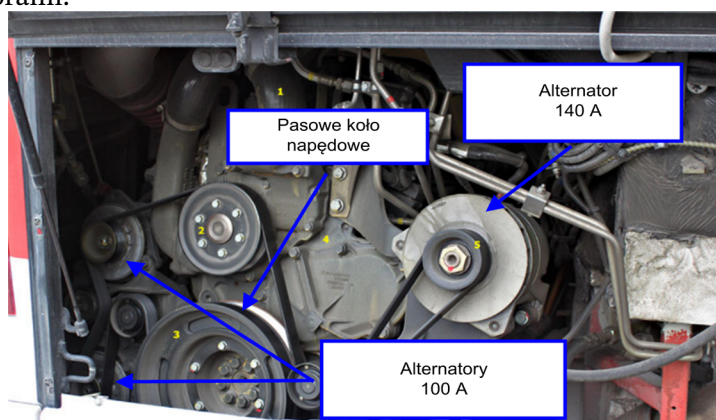


Ryc. 9.1. Badane autobusy z zainstalowanymi systemami fotowoltaicznymi: Mercedes Conecto LF (a,b), Conecto G (c,d) [173]

Badania przeprowadzono również na 2 przegubowych autobusach Mercedes Conecto G. Są to niskopodłogowe autobusy o długości 18 metrów, mogące pomieścić 148 osób (41 miejsc siedzących i 107 stojących). Silnik wysokoprężny umieszczono w wieżowej zabudowie w lewym tylnym narożniku. Jest

to jednostka o oznaczeniu OM 457 LA, o mocy 220 kW, spełniająca normę czystości spalin Euro V z wykorzystaniem AdBlue. Osiąga ona maksymalny moment 1250 Nm. Silnik współpracuje z automatyczną skrzynią firmy ZF, z której napęd jest przenoszony poprzez wał napędowy na portalowy most napędowy, również firmy ZF. Średnio w ciągu roku zużywa około 55 dm³/100 km. Autobus ma dach o powierzchni 41 m².

Na dachach autobusów zamocowane są klimatyzatory oraz wyjścia bezpieczeństwa w postaci szyberdachów. W przedniej części umieszczono również anteny. Zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną zapewniają w badanych autobusach dwa alternatory o łącznym maksymalnym natężeniu prądu 200 A (instalacja elektryczna pojazdu, kasowniki, monitoring i wyświetlacze) oraz alternator 140 A montowany w pojazdach z klimatyzacją. Na rycinie 9.2 przedstawiono komorę silnika autobusu Mercedes Conecto z zaznaczonymi alternatorami.



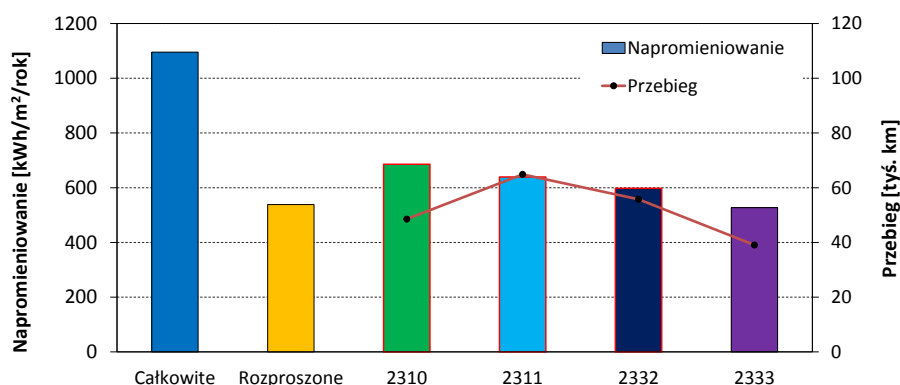
Ryc. 9.2. Komora silnika autobusu Mercedes Conecto z badanymi alternatorami [226]

9.2. Porównanie z obiektem nieruchomym

Analizy obejmowały energetyczne bilanse dzienne, miesięczne oraz roczne. Monitorowano i rejestrowano następujące parametry badanych autobusów: napięcie, natężenie prądu, natężenie promieniowania słonecznego, aktualne położenie autobusu (GPS), co umożliwiło analizę produktywności stacjonarnych i ruchomych modułów fotowoltaicznych, dostępność promieniowania słonecznego, ilość energii zużywanej przez autobus i uzupełnianej przez system korzystający z energii słonecznej.

Tab. 9.1. Średnie sumy miesięczne i roczne natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną: całkowite i rozproszone na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, całkowite na dachach 4 autobusów o numerach 310, 311, 332, 333 oraz korespondujące przebiegi pojazdów i ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni dachu autobusu oraz pokonany dystans [$\text{Wh/m}^2/\text{rok}/\text{km}$]

Miesiąc	Średnia suma miesięczna natężenia promieniowania słonecznego [kWh/m^2]					
	H					H_d
	Pollub	310	311	332	333	Pollub
I	19,2	12,8	8,8	4,7	0,0	14,7
II	42,6	28,9	15,2	23,0	1,5	24,1
III	82,6	61,6	41,3	49,0	0,0	38,6
IV	115,9	84,6	63,7	71,8	0,0	61,4
V	145,3	48,9	85,9	38,9	38,1	69,8
VI	171,8	90,3	113,7	101,5	130,2	80,2
VII	174,9	133,5	111,2	111,0	118,7	78,3
VIII	137,2	92,4	95,3	89,5	106,3	67,8
IX	100,9	65,3	45,4	53,9	73,7	45,8
X	73,1	44,8	42,5	36,5	37,7	31,0
XI	19,1	15,2	10,8	11,3	13,3	15,1
XII	12,7	7,4	5,4	6,7	7,6	11,6
Suma [$\text{kWh/m}^2/\text{rok}$]	1095,4	685,7	639,2	597,7	527,1	538,3
Udział w H [%]	100	62,6	58,3	54,6	48,1	49,1
Przebieg [km]	–	61 846	89 670	48 502	64 861	–
$\text{Wh/m}^2/\text{rok}/\text{km}$	–	14,4	8,4	14,1	9,9	–



Ryc. 9.3. Średnia suma roczna natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną: całkowite i rozproszone na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej (pollub), całkowite na dachach 4 autobusów o numerach 310, 311, 332, 333 oraz korespondujące przebiegi pojazdów

Na rycinie 9.3 oraz w tabeli 9.1 przedstawiono średnią sumę roczną napromieniowania oraz przebiegu zarejestrowanego na 4 autobusach miejskich o numerach bocznych 310, 311, 332, 333 w roku 2014. Dane te zostały zestawione z rocznym napromieniowaniem całkowitym G zmierzonym na dachu budynku oraz napromieniowaniem rozproszonym obliczonym oprogramowaniem PVGIS. Tak jak udowodniono w poprzednim rozdziale, do nieruchomej, horyzontalnie umieszczonej powierzchni 1 m^2 dociera energia całkowita słoneczna, której wartość odniesiona do pełnego roku kalendarzowego wynosi 1095 kWh. Wartość tej energii to napromieniowanie całkowite, które zawiera składnik napromieniowania rozproszonego, które w przypadku nieruchomego obiektu wynosi $538 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$.

Wartości liczbowe sum napromieniowania miesięcznego i rocznego, przebiegi oraz udziały procentowe w napromieniowaniu całkowitym na budynku przedstawiono w tabeli 9.1. Największa wartość napromieniowania całkowitego została zarejestrowana przez autobus 310 ($687 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$), a najmniejsza przez autobus 333 ($527 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$). Oznacza to, że zacienienia powodują straty w docierającej energii słonecznej. W przypadku autobusu 310 wynoszą 41,7%, zaś autobusu 333 – 51,9%. Autobus 333 był wyłączony z użytkowania przez pierwsze 4 miesiące roku, tj. od stycznia do kwietnia, stąd najniższa wartość napromieniowania oraz przebiegu rocznego. We wszystkich analizowanych przypadkach autobusów wartość napromieniowania była większa od dostępnego napromieniowania rozproszonego. Jednocześnie można zauważyć tendencję wzrostu wartości napromieniowania wraz ze wzrostem dziennej liczby przejechanych kilometrów (przebieg). Odstępstwem jest tutaj autobus 310, który mimo małego przebiegu ma największą wartość napromieniowania, a jednocześnie dosyć niski przebieg. Należy pamiętać, że pyranometry wykonywały pomiary w czasie całej eksploatacji autobusu, zarówno w czasie jazdy, jak i podczas postoju na przystankach, pętlach końcowych i zajezdni.

9.3. Porównanie podmodeli napromieniowania i przebiegu

9.3.1. Definicja i założenia podmodeli

W poprzednim rozdziale udowodniono, że pomiar pyranometrem na dachu Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej pozwala zgromadzić miarodajny przebieg sumy natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania)

na powierzchnię płaską umieszczoną horyzontalnie. Obliczona ilość promieniowania rozproszonego może w całości zostać wykorzystana w poruszającym się pojeździe. Część promieniowania odbitego oraz bezpośredniego dociera do pojazdu w zależności od trasy i warunków nasłonecznienia.

Ze względu na warunki eksploatacji ogniw na ruchomym obiekcie zmiany nasłonecznienia mogą być bardziej gwałtowne, niż jest to obserwowane w klasycznych instalacjach fotowoltaicznych. Oprócz oczywistych zmian nasłonecznienia wynikających z warunków atmosferycznych należy dodatkowo uwzględnić zmiany wynikające z przemieszczania się autobusu. Szczególnie w terenie miejskim może dochodzić do krótkotrwałych, dużych zmian nasłonecznienia wynikających z częściowego lub całkowitego przesłonięcia paneli przez drzewa, budynki itp. Z tego względu wyniki uzyskane na stanowisku mobilnym porównywano z tymi uzyskiwanymi na stanowisku stacjonarnym.

Dodatkowo wprowadzono dane z modelu Ideal i Ideal2. Model napromieniowania Ideal1 powstał w oparciu o wybór największej wartości napromieniowania spośród 4 autobusów i towarzyszącemu przebiegowi. Ze zgromadzonych danych pomiarowych z poszczególnych autobusów zbudowano podmodel sumy całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) i jego szereg czasowy Ideal1. W podmodelu Ideal1 szereg czasowy napromieniowania zbudowano z poszczególnych dni roku, poszukując w danym dniu spośród 4 autobusów maksymalnej wartości napromieniowania, co można zapisać zależnością:

$$H_{Ideal1}(i) = MAX(H_{310}, H_{311}, H_{332}, H_{333}) \quad (9.1)$$

gdzie:

$H_{310}, H_{311}, H_{332}, H_{333}$ – napromieniowanie na dany autobus [kWh/m²/dzień].

Model napromieniowania Ideal2 został zdefiniowany maksymalną wartością przebiegu pojazdu. Zbudowano szereg czasowy napromieniowania Ideal2, w którym podstawowym kryterium wyboru wartości sumy dziennej całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) spośród 4 autobusów był maksymalny przebieg dzienny oraz jego wartość powyżej 50 km. W przypadku przebiegu poniżej 50 km uznawano, że dany autobus nie jeździł i przypisywano mu zerową wartość napromieniowania. Pojedynczy punkt czasowy napromieniowania słonecznego został wybrany według następującej zależności:

$$H_{Ideal2}(i) = \left\{ \begin{array}{l} D_x > 50 \text{ km} \\ MAX(D_{310}, D_{311}, D_{332}, D_{333}) \\ MAX(D_x) \rightarrow H_x \end{array} \right\} \quad (9.2)$$

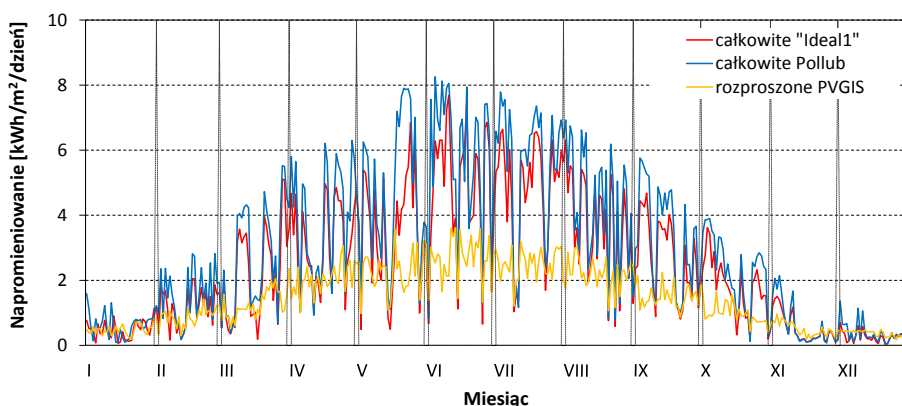
gdzie:

$H_{310}, H_{311}, H_{332}, H_{333}, H_x$ – napromieniowanie na dany autobus [kWh/m²/dzień],

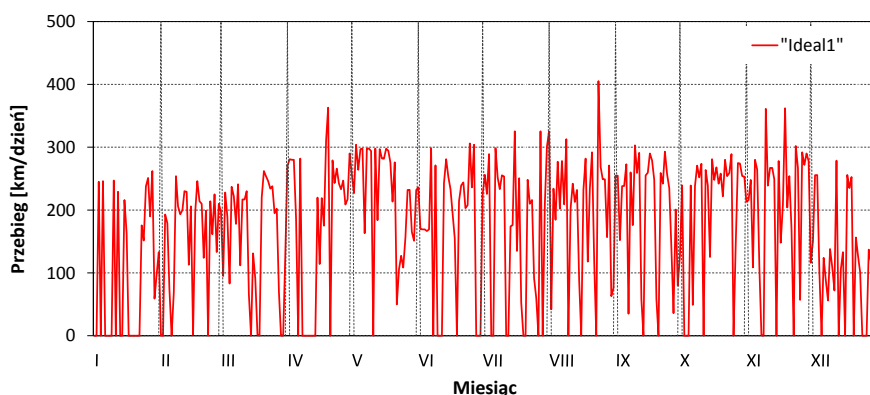
$D_{310}, D_{311}, D_{332}, D_{333}, D_x$ – przebieg w danym autobusie [km/dzień].

9.3.2. Wyniki badań oparte na danych z czterech autobusów

Poszczególne punkty szeregu czasowego średniej sumy dziennej przebiegu w modelu Ideal1 przedstawionego na rycinie 9.5 są wynikiem wyboru napromieniowania z danego autobusu i z danego dnia. Na rycinie 9.4 wartość napromieniowania z autobusów Ideal1 jest bliska wartości całkowitej zarejestrowanej na nieruchomym obiekcie (budynku). Wybór wartość maksymalnej oznacza, że dany autobus poruszał się w rejonach z małym zacienieniem lub stał w niezacienionym miejscu (w zajezdni bądź na pętli końcowej). W ujęciu tym maksymalną wartość napromieniowania, która wynosi 890 kWh/m²/rok, zestawiono z przebiegiem (ryc. 9.5), przy którym ta wartość występowała. Analizowany autobus przejechał w ciągu roku 61 846 km. Pozwoliło to w przedstawionym modelu uzyskać wartość napromieniowania 14,4 Wh/m² na przejechany kilometr. Autobus pracujący w idealnych warunkach traci jedynie 18,7% dostępnej energii słonecznej. Może to oznaczać, że z poszczególnych autobusów wzięto maksymalne wartości napromieniowania osiągane podczas postojów autobusów, których było w ciągu roku w przedstawionym modelu ponad 80. Możliwość wykorzystania energii słonecznej w czasie postoju autobusu z silnikiem spalinowym i zespołem akumulatorów jest ograniczona. Z drugiej strony w przypadku autobusu hybrydowego czy w pełni elektrycznego mamy dostęp do dużego bufora energii elektrycznej, w którym możemy zgromadzić energię elektryczną produkowaną ze Słońca.



Ryc. 9.4. Przebieg średniej sumy dziennej całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dachu autobusu w podmodelu Ideal1 w roku 2014

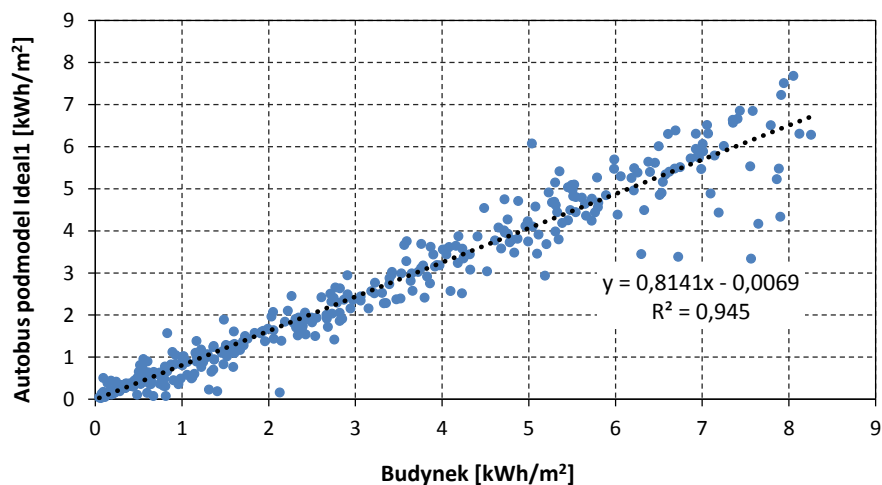


Ryc. 9.5. Średnia suma dzienna przebiegu autobusu w modelu Ideal1 w roku 2014

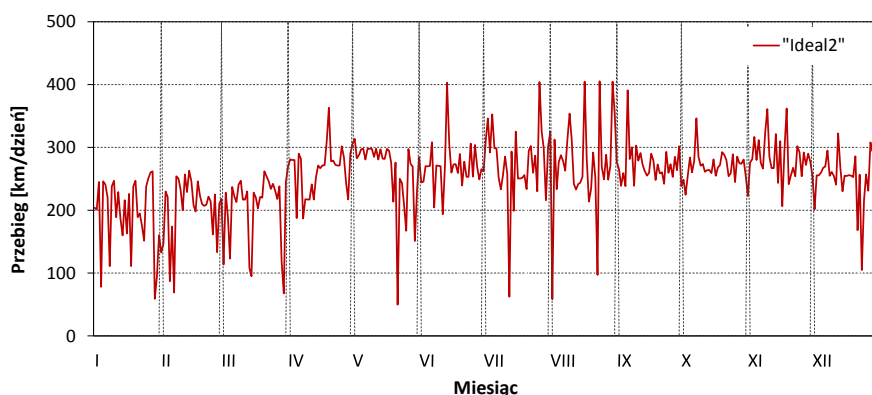
Na rycinie 9.6 przedstawiono zależność średniej sumy dziennej całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) docierającego do autobusu (model Ideal1) w funkcji docierającego do jednostkowej powierzchni budynku w czasie dnia. Przeprowadzona linia trendu przez punkty pomiarowe ma ponad 94% dokładności. Autobus eksploatowany z fazami przestojów w ciągu dnia traci jedynie około 19% docierającej energii słonecznej.

W podmodelu maksymalnego przebiegu pojazdu Ideal2 przeanalizowano przypadki, w których autobusy są eksploatowane w godzinach 5:00–23:00 bez przestojów na zajezdniach. Na rycinie 9.7 przedstawiono średnią sumę dzienną przebiegu autobusu w podmodelu Ideal2 w roku 2014. W większości

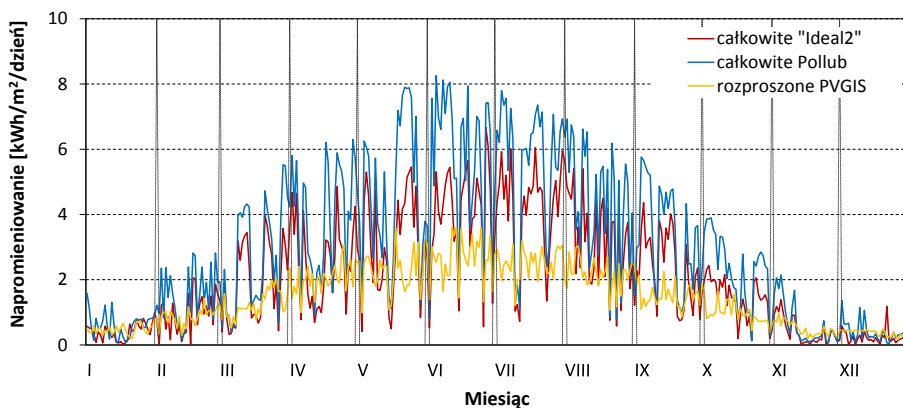
przypadków wybrana dzienna wartość przebiegu dotyczyła całodziennej eksploatacji autobusu. Średnio dany autobus przejeżdżał w ciągu 16-godzinnego czasu pracy 245 km dziennie, co rocznie dało wartość 89 670 km. Tak zbudowany szereg czasowy przebiegu posłużył do budowy szeregu czasowego napromieniowania (ryc. 9.8), którego średnią wartość dzienną przypisano zgodnie z wybranym maksymalnym przebiegiem danego autobusu. Pozwoliło to wyeliminować wielogodzinne postoje autobusu i zarejestrować dynamikę oświetlenia podczas codziennej eksploatacji.



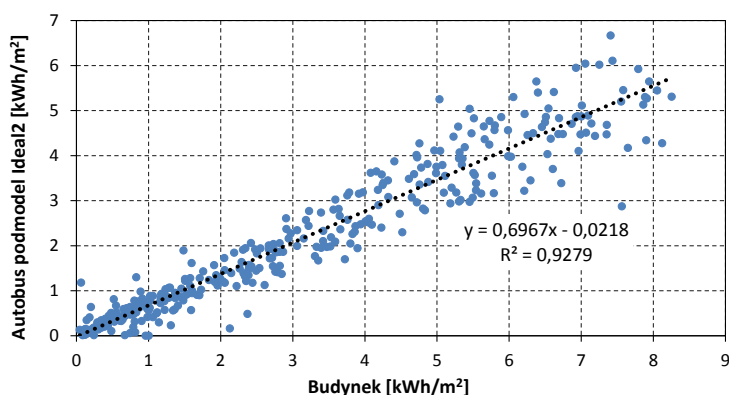
Ryc. 9.6. Zależność średniej sumy dziennej całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) docierającego do autobusu (podmodel Ideal1) w funkcji docierającego do jednostkowej powierzchni budynku



Ryc. 9.7. Średnia suma dzienna przebiegu autobusu w podmodelu Ideal2 w roku 2014



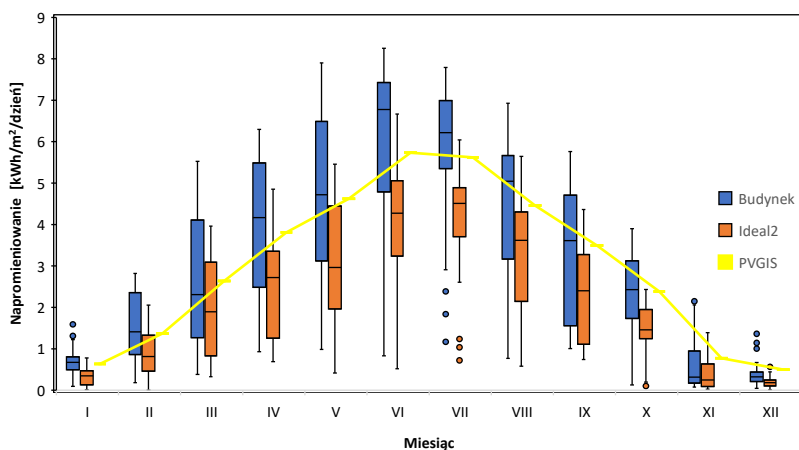
Ryc. 9.8. Przebieg średniej sumy dziennej całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dachu autobusu w podmodelu Ideal2 w roku 2014



Ryc. 9.9. Zależność średniej sumy dziennej całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) docierającego do autobusu (podmodel Ideal2) w funkcji docierającego do jednostkowej powierzchni budynku

Na rycinie 9.9 przedstawiono zależność średniej sumy dziennej napromieniowania całkowitego docierającego do autobusu w funkcji napromieniowania całkowitego docierającego do jednostkowej powierzchni w czasie dnia przy maksymalnym zarejestrowanym przebiegu z poszczególnych autobusów. Napromieniowanie całkowite w szeregu czasowym Ideal2 wynosi 749 kWh/m²/rok i jest mniejsze o 31,6% od napromieniowania obiektu stacjonarnego w postaci budynku. Przeprowadzona linia trendu przez punkty pomiarowe ma ponad

92-procentową dokładność. Autobus eksploatowany w ciągu całego dnia traci około 30% docierającej energii słonecznej.



Ryc. 9.10. Średnia suma miesięczna całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dachu autobusu w podmodelu Ideal2 oraz w PVGIS w roku 2014

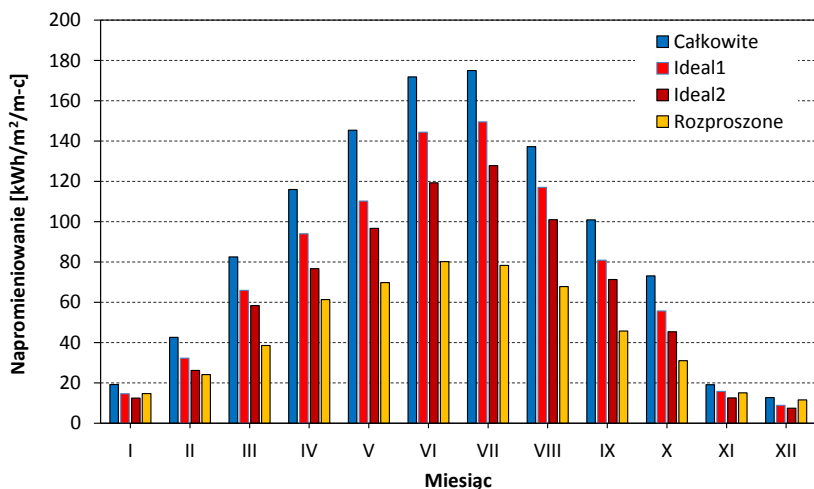
Na rycinie 9.10 przedstawiono średnie sumy miesięcznego całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) na powierzchnię poziomą na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz na dachu autobusu w podmodelu Ideal2 oraz w PVGIS w roku 2014. Dane przedstawiono w poszczególnych miesiącach, obliczając kwantyle z uwzględnieniem mediany oraz pokazując punkty odstające i wartości maksymalne i minimalne.

9.3.3. Interpretacja i dyskusja wyników

W tabeli 9.2 i na rycinie 9.11 przedstawiono porównanie napromieniowania całkowitego i pośredniego docierającego do nieruchomego obiektu oraz autobusów miejskich z modelu Ideal1 i Ideal2. W ciągu całego roku oprócz miesięcy zimowych (listopad, grudzień i styczeń) wartość napromieniowania od największego do najmniejszego układu się według kolejności: całkowite, Ideal1, Ideal2 i rozproszone.

Tab. 9.2. Średnia suma całkowitego natężenia promieniowania słonecznego H_b (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną: dach budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej (stały), podmodel Ideal1 i Ideal2 oraz rozproszonego H_d na budynku

Miesiąc	Suma natężenia promieniowania słonecznego [kWh/m ²]			
	H_b			H_d
	Stały	Ideal1	Ideal2	Stały
I	19,2	16,0	12,3	14,7
II	42,6	32,3	26,2	24,1
III	82,6	65,9	58,4	38,6
IV	115,9	94,0	76,7	61,4
V	145,3	110,2	96,7	69,8
VI	171,8	144,4	119,3	80,2
VII	174,9	149,5	127,8	78,3
VIII	137,2	117,1	101,0	67,8
IX	100,9	80,9	71,3	45,8
X	73,1	55,7	45,4	31,0
XI	19,1	15,8	12,6	15,1
XII	12,7	8,9	7,4	11,6
Suma [kWh/m²/rok]	1095,4	890,7	755,1	538,3
Udział w H_b [%]	100	81,3	68,9	49,1
Przebieg [km]	–	61 846	92 048	–
Wh/m ² /rok/km	–	14,4	8,2	–



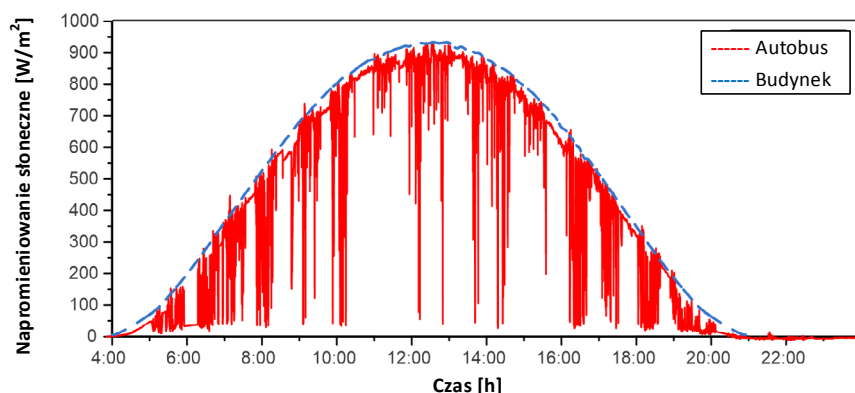
Ryc. 9.11. Średnia suma miesięczna całkowitego i rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) na powierzchnię horyzontalną na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz całkowitego w podmodelu autobusu Ideal1 i Ideal2

Hipotetyczny scenariusz przejazdu autobusu miejskiego w modelu Ideal1 brał pod uwagę wyłącznie maksymalną wartość napromieniowania, stąd w ciągu roku do jednostki powierzchni dachu dotarło napromieniowanie całkowite o wartości $14,4 \text{ Wh/m}^2$ na kilometr przejechanej trasy. W porównaniu do nasłonecznionego obiektu nieruchomego roczna wartość całkowitego napromieniowania w analizowanym modelu została zredukowana o około 19%, z 1054 kWh/m^2 na 890 kWh/m^2 . Dostępna energia słoneczna składa się z 51% napromieniowania bezpośredniego oraz 49% napromieniowania rozproszonego o wartości 538 kWh/m^2 . Zacienienia redukujące napromieniowanie całkowite pochodziły głównie z budynków, latarni ulicznych i innej infrastruktury zlokalizowanej na terenie miasta. Napromieniowanie rozproszone nie zostaje zaburzane, a nawet w pewnych warunkach jest wzmacniane przez otoczenie miejskie. Niski przebieg o wartości 61 856 km świadczył również o częstych postojach w hipotetycznym scenariuszu przejazdu. Największą wartość napromieniowania docierającą do autobusu w modelu Ideal1 zarejestrowano w lipcu – $149,5 \text{ kWh/m}^2$. Pokrywa się to z maksymalną wartością na obiekcie nieruchomym wynoszącą $174,9 \text{ kWh/m}^2$. W okresie tym zarejestrowano największą liczbę postojów. Przebieg roczny autobusu w modelu Ideal1 jest o około 33% mniejszy od przebiegu w modelu Ideal2.

Hipotetyczny scenariusz przejazdu autobusu miejskiego w modelu Ideal2 brał pod uwagę wyłącznie maksymalną wartość pokonywanego dziennego dystansu, która była kryterium wyboru napromieniowania spośród 4 rejestrowanych autobusów. Wysoki przebieg o wartość 92 048 km świadczył o krótkich postojach w hipotetycznym scenariuszu przejazdu. Stąd w ciągu roku do jednostki powierzchni dachu dotarło napromieniowanie całkowite o wartości $8,2 \text{ Wh}$ na kilometr przejechanej trasy. Autobus poruszał się w okresach dnia bez oświetlenia słonecznego, tj. wyruszał w trasę o 5:00 rano i kończył ją o godzinie 23:00. W porównaniu do wartości napromieniowania obiektu nieruchomego roczna wartość całkowitego napromieniowania w analizowanym modelu została zredukowana o około 31%, z 1095 kWh/m^2 do 755 kWh/m^2 . W analizowanych warunkach autobus wykorzystywał w ciągu roku całe napromieniowanie rozproszone i tylko 39% (217 kWh/m^2) napromieniowania całkowitego. Największą wartość napromieniowania docierającą do autobusu w modelu Ideal1, tak jak i w modelu Ideal2, zarejestrowano w lipcu – 127 kWh/m^2 .

Na rycinie 9.12 przedstawiono kolorem czerwonym wykres promieniowania słonecznego docierającego do jeżdżącego autobusu na stałej trasie oraz do dachu niezacienionego budynku (niebieska przerywana linia). Badania przeprowadzono 5 maja 2015 roku w czasie bezchmurnej pogody. Promieniowanie

słoneczne wyrażone w mocy padającej na płasko umieszczoną powierzchnię na dachu budynku jest większe niż w przypadku powierzchni poruszającej się w warunkach miejskich, w których występują zacienienia. Przejazdy po stałej trasie oddzielone są krzywymi promieniowania słonecznego, które pokrywają się (nie występuje efekt zaciniania – promieniowanie słoneczne na obu dachach jest takie samo). Efekt ten występuje w czasie postoju autobusu w strefie bez cienia na przystanku końcowym.



Ryc. 9.12. Natężenie promieniowania słonecznego (napromieniowanie) docierające do jeżdżącego autobusu na stałej trasie (czarny) oraz do dachu niezacienionego budynku (niebieski – linia przerywana)

9.4. Zużycie energii elektrycznej

Dla każdego ze stanów pracy autobusu miejskiego obliczono ilość energii elektrycznej E_{el} zużywanej przez odbiorniki oraz wytwarzanej przez alternatory [225]. Chwilową moc elektryczną P_{el} zdefiniowano jako iloczyn natężenia prądu I i napięcia U w poszczególnych układach instalacji elektrycznej autobusu:

$$P_{el}(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (9.3)$$

gdzie:

P_{el} – moc elektryczna [W],

U – napięcie [V],

I – natężenie prądu [A],

t – czas [s].

Energia elektryczna E_{el} wytworzona przez alternatory w danym czasie, tj. pomiędzy godziną 4:00 a 23:30, została obliczona jako całka oznaczona przez moc chwilową [89] odniesioną do 1 m², przy czym granice całkowania są następujące: $t_1 = 0$ a $t_2 = 70200$ s, co odpowiada 19 godzinom i 30 minutom każdego dnia, a współczynnik 3600 wynika z przeliczenia na jednostki energii kWh:

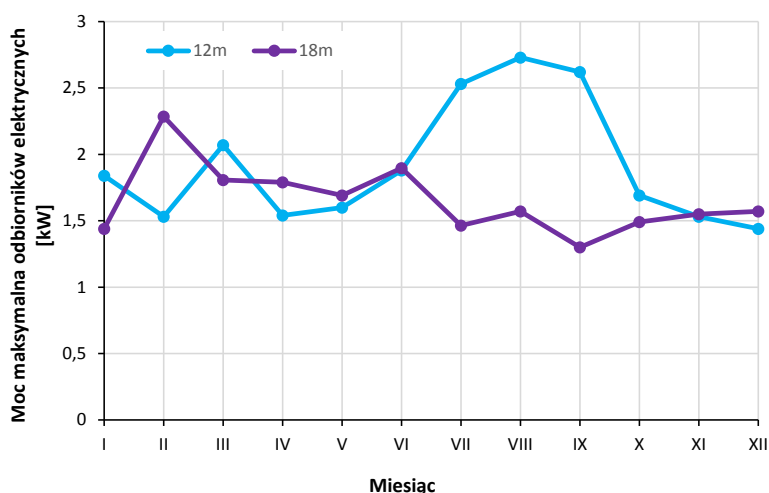
$$E_{el}(t_1, t_2) = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} P_{el}(t) dt \quad (9.4)$$

Tab. 9.3. Zarejestrowana moc odbiorników na pokładzie autobusu oraz zużycie energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach roku (badania własne)

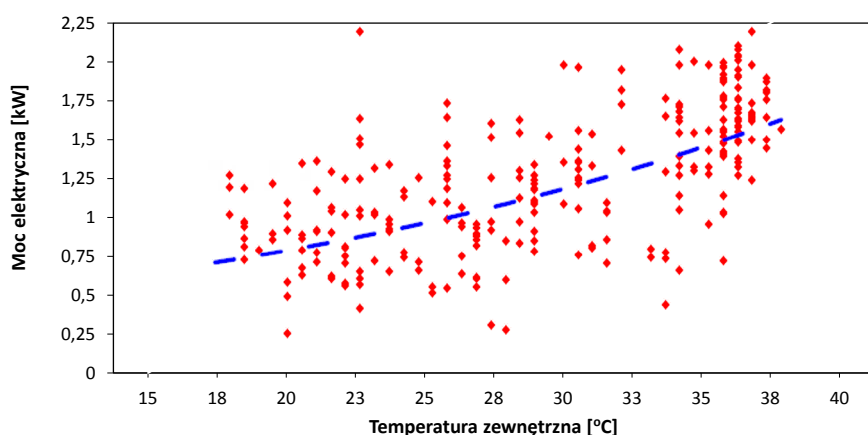
Miesiąc	Moc średnia [kW]		Moc maksymalna [kW]		Zużycie energii elektrycznej [Wh/km]	
	12 m	18 m	12 m	18 m	12 m	18 m
1	1,34	1,03	1,84	1,44	82	86
2	1,41	1,63	1,53	2,29	84	103
3	1,31	1,63	2,07	1,81	68	103
4	1,10	1,61	1,54	1,79	60	102
5	1,09	1,52	1,60	1,69	55	96
6	1,24	1,71	1,88	1,90	71	108
7	1,33	1,32	2,53	1,46	75	83
8	1,19	1,36	2,73	1,57	67	74
9	1,10	1,30	2,62	1,30	62	75
10	1,23	1,31	1,69	1,49	69	81
11	1,24	1,40	1,53	1,55	72	88
12	1,33	1,35	1,44	1,57	88	90
Średnia suma	1,24	1,43	1,92	1,65	71	90

Zwiększone zużycie energii elektrycznej przez odbiorniki elektryczne zamontowane na pokładzie pojazdu w sposób ciągły nadmiernie obciąża instalację elektryczną. Szczególnie zaraz po rozruchu silnika spalinowego. Na rycinie 9.13 oraz w tabeli 9.3 przedstawiono maksymalną i średnią zarejestrowaną moc elektryczną odbiorników instalacji elektrycznej autobusu miejskiego z układem klimatyzacji kierowcy o długości 12 m (linia niebieska) oraz 18 m (linia fioletowa) w poszczególnych miesiącach roku. Średnio w ciągu roku moc odbiorników elektrycznych na pokładzie krótkiego, 12-metrowego autobusu wynosi 1,24 kW, zaś dla 18-metrowego – 1,43 kW. W czasie przejazdów

trwających poniżej 3 h maksymalna moc pobierana przez 12-metrowy autobus miejski może przekroczyć 2,5 kW, a w przypadku autobusu 18-metrowego nawet 4 kW. W głównej mierze wynika to z konieczności doładowania akumulatorów po rozruchu silnika oraz schłodzenia/nagrzania przestrzeni pasażerskiej (wentylatory pracują z maksymalną prędkością obrotową). Potwierdza to moc maksymalna odbiorników na pokładzie autobusu długiego i krótkiego, która przekracza wartość odpowiednio 2,6 kW i 2,2 kW. Na rycinie 9.14 przedstawiono zależność mocy elektrycznej odbiorników elektrycznych od temperatury zewnętrznej.



Ryc. 9.13. Maksymalna zarejestrowana moc elektryczna odbiorników instalacji elektrycznej autobusu miejskiego z układem klimatyzacji o długości 12 m (linia niebieska) oraz 18 m (linia fioletowa) (badania własne)



Ryc. 9.14. Zależność mocy elektrycznej od temperatury zewnętrznej

10. Praktyczne wykorzystanie energii słonecznej w autobusie miejskim

10.1. Projekt systemu PV dla autobusu miejskiego

Właściwości ogniw fotowoltaicznych, istotne przy planowaniu budowy farmy fotowoltaicznej czy zabudowy na domku jednorodzinnym, są diametralnie różne od tych, które są ważne przy rozważaniu zabudowy dachu pojazdu modułami fotowoltaicznymi. Z tego względu efektywność ogniw, chociaż bardzo ważna, nie mogła być prostym i jedynym czynnikiem decydującym o wyborze danego rodzaju ogniwa. Planując zabudowę dachu, należało zoptymalizować funkcję wyboru najlepszego rozwiązania, m.in. uwzględnić uzyskanie maksymalnie dużej mocy z dostępnej powierzchni przy niejednorodnej strukturze dachu i występujących elementach zacieniających, warunki klimatyczne i nasłonecznienie w czasie pracy pojazdu, masę zabudowanych modułów, podział na sekcje i uzyskanie odpowiednich napięć. Wszystkie te czynniki i tak mogą mieć drugorzędne znaczenie ze względu na drgania wpływające na żywotność ogniw, a tym samym wydajność instalacji.

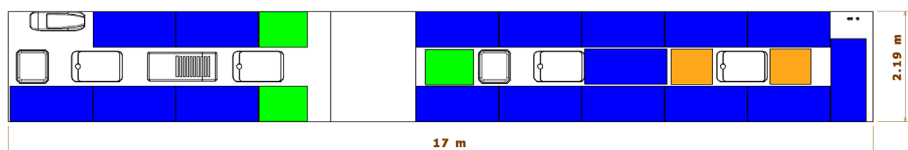
Na dachach badanych autobusów zainstalowano systemy fotowoltaiczne. W tabeli 10.1 przedstawiono moc szczytową, zajmowaną powierzchnię oraz wagę danego autobusowego systemu fotowoltaicznego. Moc systemu PV odnosi się do standardowych warunków nasłonecznienia (1000 W/m^2 , temperatura paneli na poziomie 20°C). Numery przy zestawach związane są z numerami bocznymi autobusów. Istotnym współczynnikiem była wartość mocy

z zamontowanej powierzchni modułów fotowoltaicznych (Wp/m^2). Dachy poszczególnych autobusów miały ograniczoną powierzchnię, która dodatkowo była ograniczona przez szyberdachy i klimatyzatory. Zastosowanie wysoko-sprawnych modułów fotowoltaicznych lub specjalnych projektów zagwarantuje uzyskanie dużej mocy systemu odniesionego do określonej powierzchni. Innym sposobem jest zastosowanie przeznaczonego do tego projektu modułów fotowoltaicznych, o określonej strukturze i rozmieszczeniu poszczególnych ogniw, wraz z zastosowaniem miniaturowych puszek przyłączeniowych. Obydwa rozwiązania zwiększenia mocy jednostkowej są związane z ceną za zamontowany Watt w pik (Wp) i muszą być kompromisem pomiędzy ceną za system a mocą całkowitą.

W autobusie dwuosiowym Conecto 310 system PV składał się z 4 komercyjnie dostępnych modułów fotowoltaicznych polikrystalicznych XSOL-144P-FLEX, 2 modułów polikrystalicznych XSOL-72P-FLEX oraz 4 modułów CIGS XDISC. Moc całkowita systemu wyniosła 1080 W. Modułami zostało zajęte 40% powierzchni dachu autobusu, ponieważ na dachu zamontowany był system klimatyzacyjny. W identycznym autobusie dwuosiowym Conecto 311 zwiększono udział zajmowanej powierzchni dachu przez system fotowoltaiczny do 47% poprzez zastosowanie systemu złożonego ze specjalnych modułów fotowoltaicznych opartych na tych samych ogniwach polikrystalicznych, z których zbudowane są moduły XSOL-144P-FLEX. Dodatkowo zastosowano specjalne miniaturowe puszki połączeniowe typu pen Coyo JBM2. Ogniwa w panelach fotowoltaicznych były układane podczas procesu produkcji, by uzyskać wymiar proporcjonalny do dostępnej powierzchni na dachu autobusu. Układ rozmieszczenia ogniw na poszczególnych modułach, jak i układ rozmieszczenia poszczególnych modułów, oraz zastosowanie tylko ogniw polikrystalicznych umożliwiły uzyskanie mocy całkowitej systemu o wartości 1884 W.

Tab. 10.1. Zestawy modułów fotowoltaicznych na autobusach MPK

Autobus	Moc szczytowa [Wp]	Pow. zestawu [m^2]	Pow. dachu [m^2]	Gęstość mocy [Wp/m^2]	[%] zajętej powierzchni	waga [kg]
332, 333	2880	23,18	41,76	124,24	55,5%	53,6
311	1884	12,88	27,48	146,27	46,9%	29,8
310	1080	10,99	27,48	98,27	40,0%	26,4



Ryc. 10.1. Schemat dachu autobusu 332 i 333 z zaznaczonymi panelami fotowoltaicznymi: 144 Wp (36 ogniw) – obszar niebieski, 80 Wp (20 ogniw) – obszar zielony, 64 Wp (16 ogniw) – obszar pomarańczowy [226]

Tab. 10.2. Podstawowe parametry modułów fotowoltaicznych użytych do badań

Parametry	Wartości
Moc szczytowa [Wp]	144
Sprawność [%]	14,2
Napięcie mocy maksymalnej [V]	17,86
Natężenie prądu mocy maksymalnej [A]	7,86
Napięcie obwodu otwartego [V]	22,35
Natężenie prądu zwarciovego [A]	8,17
Tolerancja mocy [%]	± 3
Napięcie maksymalne [V]	1000
NOCT [°C]	45
Zabezpieczenie diodą [A]	15
Liczba diod	2
Współczynniki temperaturowe I_{sc} [%/°C]	0,051
V_{oc} [%/°C]	-0,301
P_{max} [%/°C]	-0,384
Typ i liczba ogniw	36 poly-Si
Waga [kg]	2,68
Wymiary [m]	1,64 × 0,70 × 0,00258

W trzyosiowych przegubowych autobusach 332 i 333 system fotowoltaiczny zbudowano z komercyjnie dostępnych modułów fotowoltaicznych polikrystalicznych. Rzeczywista powierzchnia dostępna do instalacji paneli PV wynosiła około 23 m², co stanowiło około 55% dostępnej powierzchni. Moc całkowita systemu PV wyniosła 2880 Wp. Uzyskanie tak dużego udziału procentowego i mocy maksymalnej było możliwe ze względu na fakt, że na dachu autobusu nie było klimatyzatorów części pasażerskich. Przykładowy dach przegubowego autobusu komunikacji miejskiej 332 został zmodyfikowany tak, aby umieścić maksymalną liczbę komercyjnie dostępnych paneli PV.

Elementy wystające w postaci anten zostały przeniesione na przednią część dachu. Całkowita powierzchnia dachu autobusu miejskiego została podzielona w celu zainstalowania trzech różnych rodzajów paneli PV, jak pokazano na rycinie 10.1. Łącznie na dachu autobusu zainstalowano 18 paneli PV wykonanych z materiału poliwęglanowego model XSOL-144P-FLEX, 2 panele model XSOL-80P-FLEX i 2 panele model XSOL-64P-FLEX. Całkowita waga zainstalowanych paneli PV wyniosła 54 kg. Panele zamocowano do dachu za pomocą dwustronnej taśmy z pianki akrylowej o grubość 0,6 mm i szerokość 18 mm. Dane techniczne paneli PV modelu XSOL-144P-FLEX zestawiono w tabeli 10.2. W podstawowym panelu o mocy 144 Wp zastosowano 36 ogniw fotowoltaicznych z krzemu polikrystalicznego o wymiarze 25×25 mm. Moc szczytowa w standardowych warunkach testowych wynosi 144 Wp, a jego wymiary to $1640 \times 700 \times 25,8$ mm, przy masie 2,7 kg.

Na rycinie 10.2 przedstawiono hybrydowy system generowania energii na pokładzie autobusu złożony z systemu fotowoltaicznego, zespołu akumulatorów i zespołu alternatorów połączonych mechanicznie z silnikiem spalinowym. Kontrolery-regulatory PV zamontowano w części pasażerskiej i podłączono do układu akumulatorów. Każdy z nich podłączony jest do osobnego łańcucha, dzięki czemu można łatwo regulować moc systemu PV, dopasowując ją do danego pojazdu. Panele PV są podzielone na ciągi 40 V, aby zagwarantować odpowiednią nadwyżkę napięcia z powodu konwersji i strat energii. Instalacja ma 10 sekcji o łącznej liczbie 720 ogniw. Diody bocznikujące montowane są co 10 V w pobliżu ogniw PV. Zespół alternatorów to dwa alternatory 100 A oraz jeden 140 A. Oba alternatory o maksymalnym natężeniu prądu wyjściowego 100 A są napędzane przez pas transmisyjny z przełożeniem 4:1, a kolejny alternator – 140 A – jest napędzany przez pas transmisyjny z przełożeniem 2,71. Zespół akumulatorów stanowią dwa ołowiowe akumulatory o łącznej pojemności 400 Ah i napięciu 24 V, co stanowi magazyn energii elektrycznej o wartości 9,6 kWh.

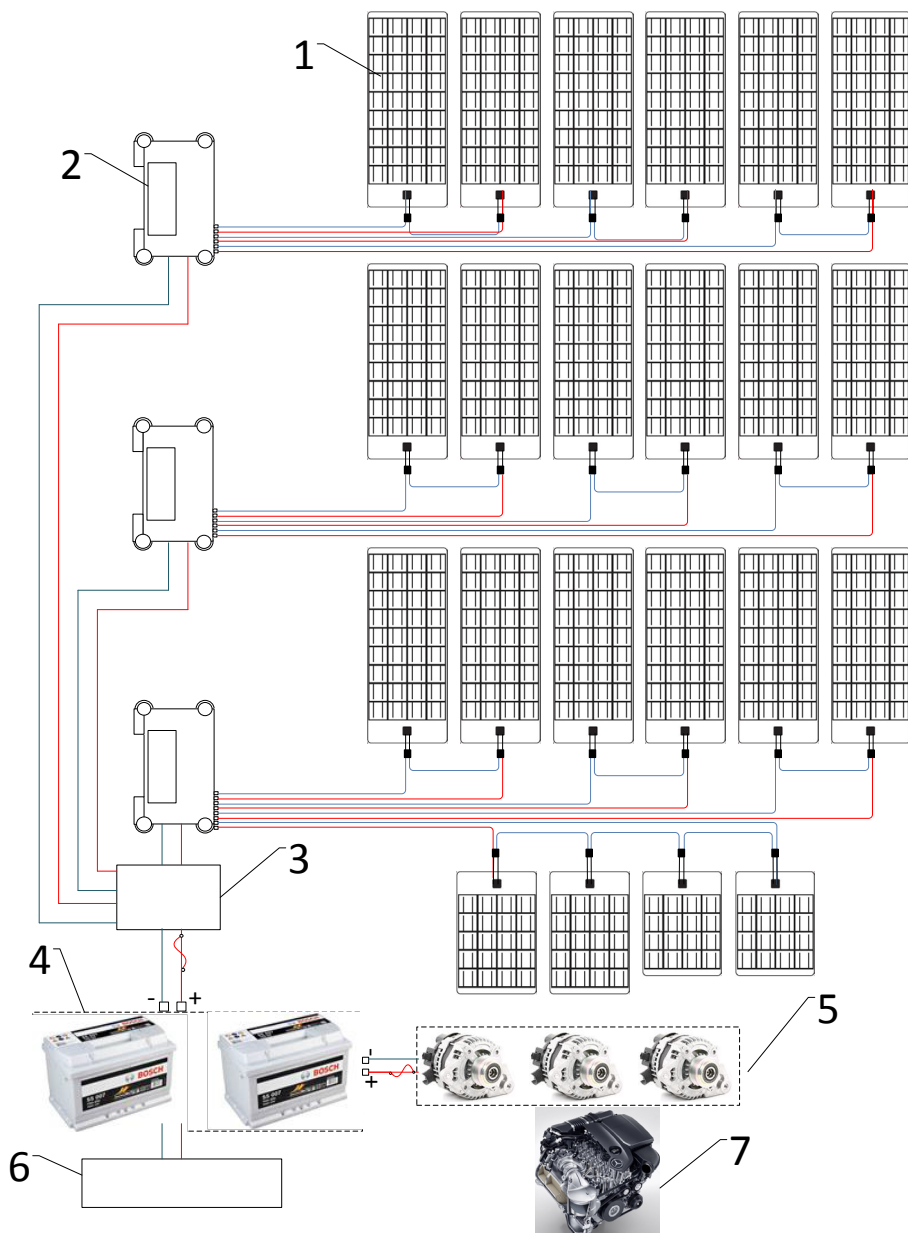
Fotowoltaiczny system wytwarzania energii elektrycznej pracuje w 4 trybach operacyjnych. W pierwszym, w którym pojazd nie ma uruchomionego silnika oraz odbiorniki elektryczne nie pobierają energii elektrycznej z akumulatora, system PV bezpośrednio ładuje akumulatory poprzez kontrolery-regulatory do napięcia 28,5 V. W drugim trybie, podczas krótkich postojów z wyłączonym silnikiem, część odbiorników elektrycznych na pokładzie autobusu w postaci wyświetlaczy, kasowników i oświetlenia wewnętrznego zasilana jest z systemu PV, a nadmiar energii przekazywany jest na doładowywanie akumulatorów. W trzecim trybie, po uruchomieniu silnika spalinowego, system

PV uzupełnia energię produkowaną przez alternatory i zasila urządzenia elektryczne na pokładzie pojazdu. Nadmiar energii przekazywany jest do akumulatorów. W warunkach niewystarczającego uzysku energii słonecznej lub awarii systemu PV układ wykrywania przepływu zwrotnego zapewnia, że energia elektryczna zmagazynowana w akumulatorach i produkowana przez system alternatorów nie jest przekazywana do systemu PV. Zastosowano pomiar natężenia prądu wstecznego oraz diody blokujące. Sama dioda nie zarejestruje, czy nastąpił przepływ wsteczny, ale układ tak, co jest istotne, biorąc pod uwagę działanie systemu wytwarzania energii. Wówczas energia elektryczna dostępna jest na pokładzie pojazdu poprzez oryginalny układ elektryczny składający się z akumulatorów i alternatorów.

Tab. 10.3. Moc odbiorników elektrycznych na pokładzie autobusu

Odbiornik elektryczny	Moc maksymalna [W]
Tablice informacyjne, oświetlenie, kasowniki, ładowarki	560
Oświetlenie wewnętrzne	84
Światła pozycyjne i oświetlenie zewnętrzne	252
Światła mijania	252
Wentylacja	252
System klimatyzacji dla kierowcy	532
Razem	1932
Rozruch silnika	8500
Alternator 100 A	2800
Alternator 140 A	4000

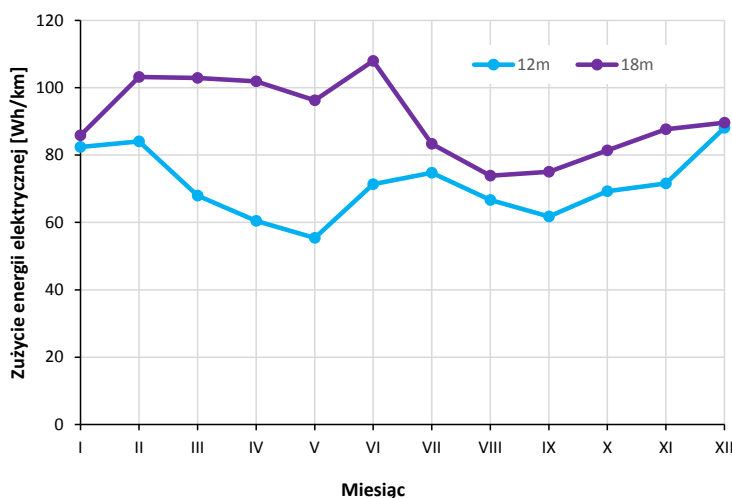
W tabeli 10.3 zestawiono moc odbiorników w instalacji elektrycznej przegubowego autobusu miejskiego Mercedes Conecto G, w tym wyświetlaczy trasy, monitorów reklamowych, kasowników, wentylatorów klimatyzacji i ogrzewania, systemów monitoringu czy oświetlenia wnętrza oraz urządzeń niezbędnych do zapewnienia prawidłowej pracy silnika i pojazdu. Akumulatory ładowane po uruchomieniu silnika spalinowego to odbiorniki, które mają największą moc i jednocześnie zużywają najwięcej energii. Drugim pod względem mocy elektrycznej jest system wentylacji oraz zintegrowane systemy grzewcze umieszczone w kanałach dachowych. Łącznie maksymalna moc odbiorników elektrycznych wynosi około 2 kW, nie licząc doładowywania akumulatorów po rozruchu.



Ryc. 10.2. Schemat hybrydowego system generowania energii elektrycznej na pokładzie autobusu: 1 – panel fotowoltaiczny, 2 – kontroler-regulator PV, 3 – przyłącze, 4 – zespół akumulatorów, 5 – zespół alternatorów, 6 – instalacja elektryczna 24 V, 7 – silnik spalinowy

10.2. Efektywność i wpływ na pojazd

Na rycinie 10.3 i w tabeli 8.4 przedstawiono zużycie energii elektrycznej w ujęciu rocznym dla autobusu krótkiego, 12-metrowego, oraz przegubowego, 18-metrowego, w przeliczeniu na przejechany dystans. Autobus krótki zużył w ciągu roku średnio 71 Wh/km, a długi 90 Wh/km energii elektrycznej. Oba typy przejechały w analizowanym okresie odpowiednio 55 102 km i 62 628 km. Największe zużycie energii elektrycznej przekraczające wartość 100 Wh/km zanotowano w okresie luty–czerwiec w przypadku autobusu długiego i w okresie grudzień–luty dla autobusu krótkiego (wartość powyżej 80 Wh/km). Najniższe zużycie energii w przeliczeniu na kilometr wyniosło odpowiednio 55 Wh/km (maj) i 74 Wh/km (sierpień) dla autobusu o długości 12 metrów i 18 metrów. Niskie zużycie energii zostało zarejestrowane dla dwóch analizowanych wielkości autobusów w miesiącach wakacyjnych (sierpień–wrzesień).



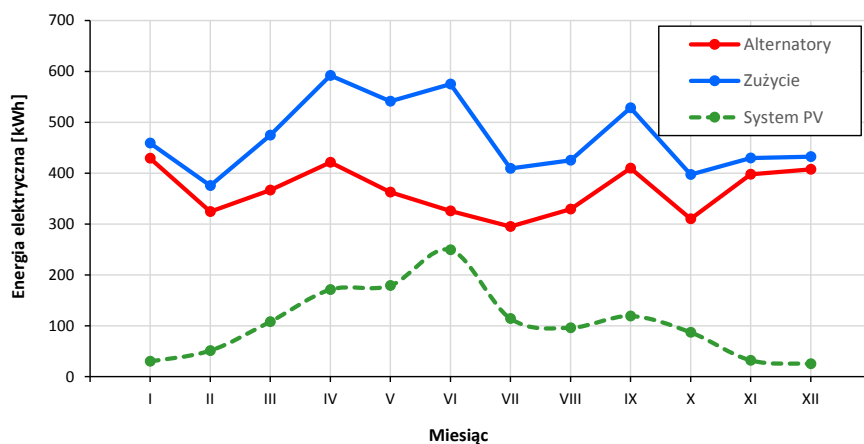
Ryc. 10.3. Zarejestrowane zużycie energii elektrycznej autobusu miejskiego o długości 12 m (linia niebieska) oraz 18 m (linia fioletowa) w ujęciu rocznym w przeliczeniu na przejechany dystans (badania własne)

Na rycinie 10.4 i 8.5 oraz w tabeli 10.4 przedstawiono zużycie energii elektrycznej, jej produkcję przez system fotowoltaiczny i zespoły alternatorów w ujęciu rocznym odpowiednio dla autobusu przegubowego o długości 18 metrów i średniego o długości 12 metrów. Autobus krótki zużył 3923 kWh energii elektrycznej, przejeżdżając dystans około 55 tys. km, a przegubowy długi 5640 kWh i odpowiednio 63 tys. km. Większe zużycie energii elektrycznej autobusu długiego spowodowane jest różnicą w objętości przestrzeni pasażerskiej

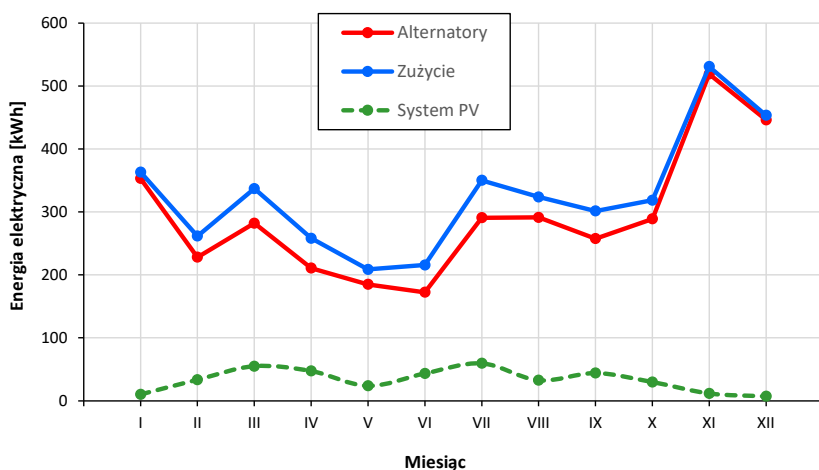
i związanym z tym zapewnieniem odpowiedniej temperatury wnętrza. Ponadto autobus przegubowy przejechał o 14% większy dystans. Autobus przegubowy 233 zużył 5640 kWh energii elektrycznej, z czego 4378 kWh (78%) zostało wyprodukowane z energii chemicznej zawartej w paliwie przez zespół alternatorów połączonych mechanicznie z silnikiem spalinowym, a 1261 kWh (22%) zostało wyprodukowane przez system fotowoltaiczny na dachu autobusu. Analizowany autobus zużywa najwięcej energii elektrycznej w okresach wiosenno-letnich (ryc. 10.4). Maksymalna wartość zużycia w ciągu roku wyniosła 592 kW w kwietniu i 575 kW w czerwcu. Głównym źródłem zużycia energii elektrycznej w autobusach są wentylatory systemu grzewczego oraz oświetlenie zewnętrzne i wewnętrzne. Jednocześnie w tym okresie ze względu na duże nasłonecznienie system fotowoltaiczny generuje dodatkowy strumień energii elektrycznej. W okresie wiosenno-letnim zwiększa się udział energii produkowanej ze Słońca w ogólnym bilansie. W czerwcu system fotowoltaiczny wyprodukował na długim autobusie najwięcej energii elektrycznej (249 kWh) i zastąpił 43% energii produkowanej z energii chemicznej paliwa w alternatorach. W okresie wakacyjnym (lipiec–sierpień) średnie zużycie energii elektrycznej spadło do wartości około 400 kWh. Mniejsza liczba przewożonych pasażerów miała bezpośredni wpływ na ilość traczonej energii cieplnej wymienianej z otoczeniem i wnętrzem autobusu. Autobus o długości 12 metrów zużył 3922 kWh energii elektrycznej, z czego 3524 kWh (90%) zostało wyprodukowane z energii chemicznej zawartej w paliwie przez zespół alternatorów połączonych mechanicznie z silnikiem spalinowym, a 397 kWh (10%) zostało wyprodukowane przez system fotowoltaiczny na dachu autobusu. Większa produkcja energii elektrycznej autobusu długiego za pomocą systemu fotowoltaicznego to efekt znaczącej różnicy łącznej mocy maksymalnej paneli fotowoltaicznych. Autobus długi (nr 233) miał system PV o mocy 2880 Wp, a autobus krótki o mocy 1080 Wp. Analizowany autobus zużywa najwięcej energii elektrycznej w okresach jesienno-zimowych (ryc. 10.5). Maksymalna wartość zużycia energii elektrycznej w ciągu roku wyniosła 531 kW w listopadzie. Jednocześnie w tym okresie ze względu na małe nasłonecznienie system fotowoltaiczny generuje mało energii elektrycznej. W okresie maj–czerwiec średnie zużycie energii elektrycznej spadło do wartości około 200 kWh. Jednocześnie w okresie wiosenno-letnim zwiększa się udział energii produkowanej ze Słońca w ogólnym bilansie. W lipcu system fotowoltaiczny wyprodukował na długim autobusie najwięcej energii elektrycznej (59 kWh) i zastąpił około 27% energii produkowanej z energii chemicznej paliwa w alternatorach.

Tab. 10.4. Zużycie energii elektrycznej (linia niebieska) przez autobus oraz jej produkcja przez zespół alternatorów (linia czerwona) i system fotowoltaiczny (linia zielona) zarejestrowane w ciągu roku

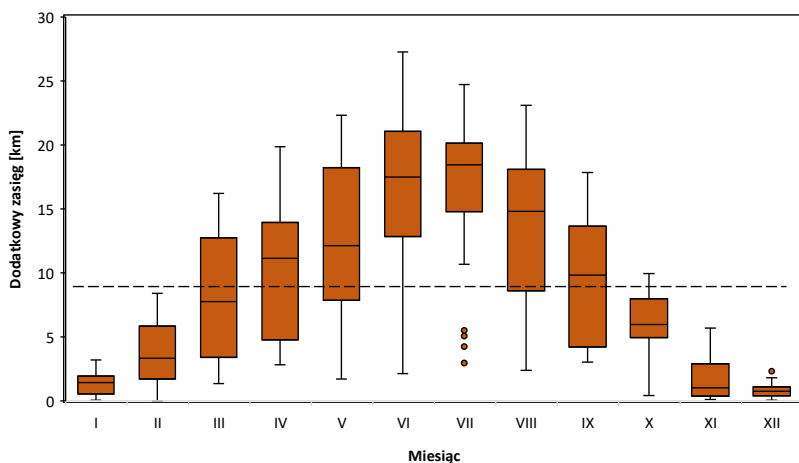
Miesiąc	Zużycie energii [kWh]		Produkcja energii elektrycznej [kWh]				Przebieg [km]	
			Alternatory		System PV			
	12 m	18 m	12 m	18 m	12 m	18 m	12 m	18 m
I	363	459	353	429	10	30	4407	5346
II	262	375	228	324	34	51	3111	3638
III	337	475	282	367	55	108	4956	4612
IV	258	592	211	421	47	171	4268	5808
V	209	541	185	362	24	179	3766	5623
VI	216	575	172	326	43	249	3024	5323
VII	350	409	291	295	59	114	4683	4907
VIII	324	425	291	329	33	96	4853	5758
IX	301	529	257	410	44	119	4878	7041
X	319	397	289	310	30	87	4598	4879
XI	531	430	519	398	12	32	7413	4897
XII	453	433	446	408	7	25	5145	4826
Rok	3922	5640	3524	4378	398	1261	55102	62658



Ryc. 10.4. Zużycie i produkcja energii elektrycznej w ciągu roku na pokładzie 18-metrowego, przegubowego autobusu miejskiego (nr 333) z systemem fotowoltaicznym



Ryc. 10.5. Zużycie i produkcja energii elektrycznej w ciągu roku na pokładzie 12-metrowego autobusu miejskiego (nr 311) z systemem fotowoltaicznym



Ryc. 10.6. Prognozowane zwiększenie zasięgu autobusu elektrycznego w poszczególnych miesiącach roku. Założenia: roczna suma natężenia promieniowania słonecznego z podmodelu Ideal2, sprawność systemu PV 18%, powierzchnia systemu PV 25 m² oraz średnie zużycie energii elektrycznej pojazdu 110 kWh/100 km

Na rycinie 10.6 przedstawiono prognozowane zwiększenie zasięgu autobusu elektrycznego przy założeniu napromieniowania z podmodelu Ideal2, systemu fotowoltaicznego o sprawności 18%, zajmującego 25 m² powierzchni dachu, oraz średniego zużycia energii elektrycznej o wartości 110 kWh/100 km. Dane przedstawiono w poszczególnych miesiącach, obliczając kwantyle z uwzględnieniem mediany oraz pokazując punkty odstające, a także wartości maksymalne i minimalne. Średnio w ciągu roku autobus elektryczny

z systemem PV może mieć o 8 km większy zasięg. Maksymalnie zasięg ten w poszczególnych dniach czerwca może zwiększyć się o 27 km. W miesiącach jesienno-zimowych system doładowuje baterie i może być źródłem zasilania dla elektrycznych odbiorników pokładowych.

10.3. Wyzwania i rekomendacje dla praktycznego wdrożenia

10.3.1. Układ sterowania

W docelowym systemie autobusowym powinien zostać zastosowany układ bazujący na MPPT (Maximum Power Point Tracking). System PV jest w ruchu, co prowadzi do szybkich zmian na krzywej napięcia i natężenia. W czasie badań porównywalny stan obciążenia modułów fotowoltaicznych na dachu autobusu i na dachu budynku uzyskano, stosując układ elektroniczny utrzymujący napięcie generowane przez moduł na stałym poziomie równym 15 V. Zrezygnowano z poszukiwania optymalnego punktu pracy ze względu na przyjętą metodykę badań. Zasada działania algorytmu MPPT polega na tym, że system sterowania szuka takiego punktu pracy, który może charakteryzować się maksymalną mocą panelu PV. MPPT zależy głównie od intensywności promieniowania słonecznego, temperatury powierzchni modułu itp. i w ten sposób zapewnia bardziej wydajną instalację. Jest to punkt, w którym moduł osiąga swoją maksymalną moc w danych warunkach poprzez zmianę obciążenia, które jest określone przez natężenie prądu, za pomocą elektronicznego urządzenia sterującego, tak aby maksymalna moc mogła być osiągnięta dla napięcia przy tym natężeniu. Zastosowane napięcie pracy modułu równe 15 V nie odbiega w znacznym stopniu od punktu pracy, w którym występuje maksymalna moc generowana przez zastosowany moduł. Według charakterystyk producenta MPPT dla stosowanych ogniw polikrystalicznych zakres MPPT zawiera się w przedziale 14–18 V w zależności od sumy natężenia promieniowania słonecznego i temperatury otoczenia.

Miejscowe zacienianie modułów wpływa na niedopasowanie w krzywych napięcie–natężenie, co wymaga zastosowania specyficznego połączenia ogniw w oddzielne konwertery na napięcie stałe. Ponadto istnieje potrzeba opracowania systemu sterowania PV dopuszczonego do sprzedaży na rynku motoryzacyjnym.

10.3.2. Sprawność technologii fotowoltaicznej

W czasie badań stosowano dostępne półelastyczne panele fotowoltaiczne o mocy maksymalnej do 15%. Obecne technologie zapewniają większą sprawność. Wydajność ogniw oraz modułów fotowoltaicznych znacznie wzrosła w ciągu ostatnich kilku lat, dzięki wielu postępom w technologii ogniw PV, w tym: MBB, IBC, Half Cut, PERC, LDSE i Bifacial. Większość z nich dotyczy styków czołowych, gdzie przewodniki i szyny zbiorcze, które zakrywają część powierzchni czołowej, uniemożliwiają wykorzystanie maksymalnej ilości światła słonecznego. Węższe przewody wbudowane w głębokie rowki (ukryte ogniwa kontaktowe) mogą zatem zwiększać powierzchnię absorpcji bez ograniczania przewodzenia prądu elektrycznego. LG Energy, REC, Trina i Canadian Solar opracowało system MBB (*ang. multi-busbar*) wykorzystujący do 12 lub 16 bardzo cienkich przewodów okrągłych zamiast płaskich szyn zbiorczych. Szyny zbiorcze to cienkie przewody lub taśmy, które przechodzą przez każde ogniwo i przenoszą elektrony (prąd) przez panel słoneczny. Ponieważ ogniwa PV stały się bardziej wydajne i generują więcej energii elektrycznej w ostatnich latach, większość producentów przesunęła się z 3 szyn zbiorczych na 5 lub 6. Szyny zbiorcze z wieloma przewodami okrągłymi zapewniają mniejszą rezystancję i krótszą drogę elektronów do przemieszczania się wzdłuż palców, co przekłada się na większą wydajność. Dodatkowo, jeśli do mikropęknięcia w ogniwie dojdzie na skutek uderzenia, dużego obciążenia lub osób chodzących po panelach, więcej szyn zbiorczych pomaga zmniejszyć ryzyko pojawienia się gorących miejsc (*ang. hot spot*) na skutek mikropęknięć, ponieważ zapewniają one alternatywną drogę przepływu elektronów. Drugi sposób, spopularyzowany przez firmę SunPower, to zabudowa styków kontaktowych z tyłu ogniwa. Ogniwa IBC (Interdigitated Back Contact) są łatwiejsze do wytworzenia, ponieważ nie ma taśm do lutowania. Zamiast tego ogniwa są umieszczone z tyłu na folii, która zawiera przewodniki i zintegrowane punkty kontaktowe i która jest stopiona z laserem w celu utworzenia połączenia przewodzącego. Dodatkowo tylne ogniwa kontaktowe mogą być umieszczone bliżej siebie, zwiększając wydajność powierzchniową.

Moduły dzielone z ogniwami półciętymi (*ang. half cut*) pozwalają ograniczyć straty mocy na linii ogniwo–moduł, wynikające z dużej powierzchni ogniwa w stosunku do liczby elektrod zbiorczych. W typowym module znajduje się 60 ogniw o rozmiarach 156 × 156 mm. Wykorzystując przecięte na pół ogniwa, moduł słoneczny został skutecznie podzielony na 2 mniejsze panele o wydajności 50%, które pracują równolegle. Ma to wiele zalet, w tym

zwiększoną wydajność dzięki niższym stratom rezystancyjnym przez szyny zbiorcze. Ponieważ każde ogniwo jest o połowę mniejsze, wytwarza ono połowę natężenia prądu przy tym samym napięciu, co oznacza, że szerokość szyny zbiorczej może być zmniejszona o połowę, co z kolei zmniejsza zacielenie ogniwa, straty i zwiększa wydajność. Niższa wartość natężenia prądu przekłada się również na niższą temperaturę ogniwa, zmniejszając tym samym potencjalne powstawanie i intensywność gorących miejsc na skutek miejscowego zacielenia, zabrudzenia lub uszkodzenia ogniwa.

Ogniwa PERC (Passivated Emitter Rear Cell) z pasywnymi emiterami na tylnej części ogniwa stosowane są przez Longi Solar i innych czołowych producentów. Pasywacja polega na umieszczeniu dodatkowej warstwy dielektryka, która ulepsza proces wychwytywania promieniowania słonecznego i optymalizuje proces gromadzenia elektronów. Spodnia pasywacja złącza powoduje odbicie promieni słonecznych z powrotem do bazy ogniwa oraz ogranicza przyciąganie elektronów do dolnej warstwy kontaktowej (aluminiowej elektrody). Ogniwo wykorzystuje w ten sposób promieniowanie o dużej długości fali (rano, wieczór i pochmurne dni), zamiast uwalniać elektrony w tylnej części i zamieniać je w ciepło jak w klasycznym ogniwie.

Ogniwa LDSE (Laser-Doped Selective Emitters) z selektywnymi emiterami charakteryzują się przednią stroną (emiterami) z domieszką niejednorodną: krzem jest silniej domieszkowany pod zadrukowanymi palcami niż między stykami. Wyższy poziom domieszkowania pod palcami kontaktowymi obniża oporność kontaktową, natomiast niższy poziom domieszkowania między palcami kontaktowymi powoduje wyższy stopień sprawności. Zupełnie inne podejście stosuje się w przypadku komórek typu n, gdzie zamiast domieszki p materiałem bazowym z domieszką krzemową jest typ n, co zmniejsza straty rekombinacji. Ważną zaletą krzemu typu n jest to, że prawie wszystkie metaliczne zanieczyszczenia i wiele innych defektów w dostawie krzemu mają asymetryczne przekroje wychwytywania elektronów i otworów. Żywotność nośników z krzemu typu n jest większa niż nośników z krzemu typu p lub, innymi słowy, straty wynikające z rekombinacji są mniejsze. Kolejną istotną zaletą krzemu typu n jest to, że gdy jest wystawiony na działanie światła, nie jest dotknięty typowymi skutkami degradacji występującymi w krzemie z domieszką boru.

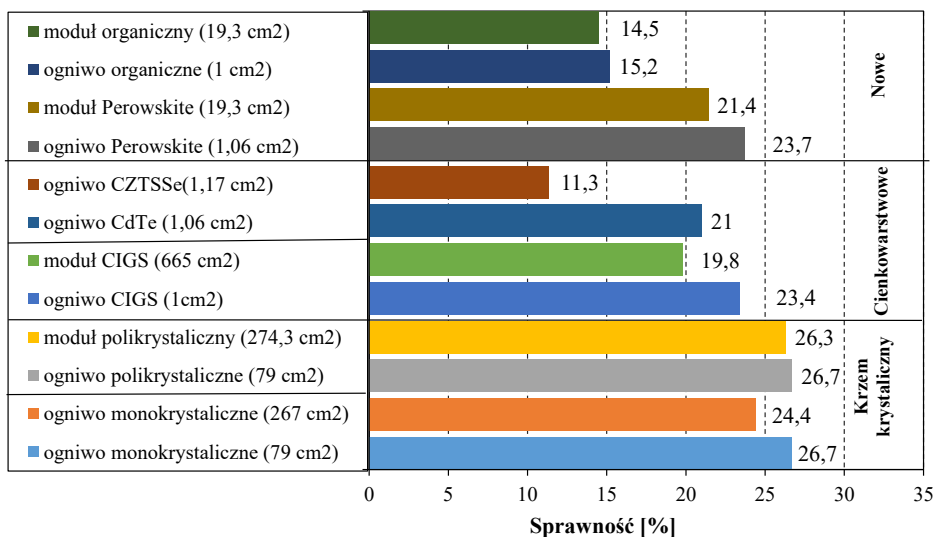
Dwustronny (ang. *bi-facial*) moduł fotowoltaiczny pochłania światło z obu stron i może wyprodukować do 27% więcej energii niż tradycyjne moduły jednostronne [238]. W swojej konstrukcji wykorzystują szklany przedni i przezroczysty tylny polimerowy arkusz do obudowy ogniw monokrystalicznych,

które pozwalają na wykorzystanie odbitego światła z tylnej strony modułu. Moduły dwustronne mogą również wykorzystywać szklaną ścianę tylną, która jest bardziej wytrzymała i może znacznie zmniejszyć ryzyko awarii. Tradycyjnie dwustronne moduły słoneczne są stosowane tylko w instalacjach naziemnych w obszarach, gdzie światło słoneczne jest łatwo odbijane od otaczających powierzchni (np. piasek), w szczególności w regionach podatnych na opady śniegu i na skrajnych szerokościach geograficznych.

Na rycinie 8.7 przedstawiono wykres rozwoju sprawności badawczych fotowoltaicznych ogniw opracowany przez Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnych NREL (National Renewable Energy Laboratory). Ogniwa fotowoltaiczne znajdujące się na tym wykresie mają sprawności potwierdzone przez niezależne uznane laboratoria badawcze, np. NREL, AIST, JRC-ESTI i Fraunhofer-ISE, które podlegają standaryzacji. Pomiary dla nowych pozycji muszą być zgodne ze standardowymi warunkami badań lub raportowania określonymi przez globalne widmo referencyjne dla urządzeń płaskich oraz bezpośrednie widmo referencyjne dla koncentratorów wymienionych w normach IEC 60904-3 wydanie 2 lub ASTM G173. Sprawność elementów fotowoltaicznych wyznaczana jest w tzw. warunkach standardowych STC (Standard Test Conditions). Wyniki sprawności ogniw są podawane w ramach następujących rodzin półprzewodników: wielozłączowe, jednozłączowe arsenku galu, krzem krystaliczny, cienkowarstwowe oraz powstające. Około 28 różnych podkategorii oznaczono charakterystycznymi kolorowymi symbolami. Najnowszy rekord sprawności dla każdej z technologii jest zaznaczony wzdłuż prawej krawędzi wykresu w postaci flagi, która zawiera sprawność i symbol technologii. Firma lub grupa, która wyprodukowała urządzenie dla każdego najbardziej znaczącego rekordu, została pogrubiona na wykresie.

Badania laboratoryjne wykazały, że ogniwa krzemowe oparte na pojedynczym półprzewodniku mogą osiągnąć sprawność 25%. Prawie 40-letnia historia rozwoju ogniw fotowoltaicznych pozwoliła na osiągnięcie 47% sprawności ogniw (wielowarstwowe z koncentratorem). Jednak jest to parametr osiągalny jedynie w laboratorium. Instytut Fraunhofera podaje, że na koniec roku 2021 rekordowa sprawność ogniw wyniosła w zależności od rodzaju technologii:

- monokrystaliczne – 26,7%,
- polikrystaliczne – 22,3%,
- cienkowarstwowe CIGS – 23,4%,
- cienkowarstwowe CdTe – 21%,



Ryc. 10.8. Największa sprawność poszczególnych technologii modułów oraz ogniwo fotowoltaicznych pod koniec 2021 roku. Na podstawie [99]

Tab. 10.5. Zestawienie produkowanych w 2020 roku modułów fotowoltaicznych o największej wartości sprawności

Producent	Model	Moc [W]	Sprawność [%]
SunPower	Maxeon3	400	22,6
LG	Neon R	375	21,7
REC	Alpha	380	21,7
Longi Solar	Hi-Mono X	355	20,3
QCells	QPeak Duo G6+	350	20,1
Jinko Solar	Cheetah HC	340	20,1
Panasonic	HiT N300	330	19,7
Trina Solar	SpliMax	335	19,7
Ja Solar	JAM60S10	330	19,6
Phono Solar	Twin Plus	330	19,6

Należy zauważyć, że sprawność modułów jest niższa niż sprawność ogniwo. Zostało to przedstawione na rycinie 10.8. Sprawność konwersji energii najlepszych komercyjnych modułów monokrystalicznych jest o około 3–4% niższa od najlepszej sprawności pojedynczych ogniwo [191]. W ciągu ostatnich 10 lat sprawność przeciętnych komercyjnych modułów krzemowych opartych

wzrosła z około 12% do 17% (mono 21%). W tym samym czasie wydajność modułów CdTe wzrosła z 9% do 18% [76].

W tabeli 10.5 przedstawiono 10 najlepszych producentów modułów fotowoltaicznych w 2020 roku, sklasyfikowanych na podstawie najwyższej sprawności modułów fotowoltaicznych, jakie mają do zaoferowania. Ogniwa produkowane przez SunPower Corporation dostępne na rynku również w elastycznych modułach fotowoltaicznych osiągają maksymalną sprawność o wartości 22,6%.

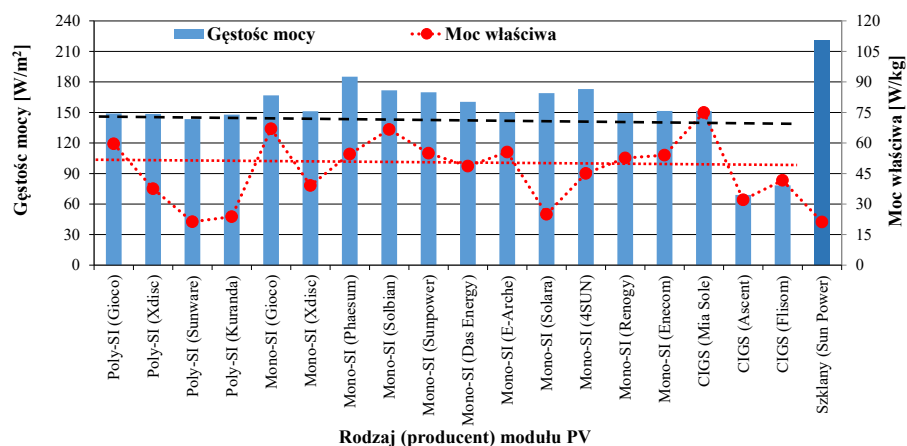
10.3.3. Gęstość mocy i moc właściwa systemu fotowoltaicznego

Konstrukcja półelastyczna przylegająca do dachu pojazdu jest narażona na uszkodzenie przez operatorów serwisujących system klimatyzacji. Należy wziąć pod uwagę możliwość zastopowania modułów ze sztywną ramą i szkłem, które niewiele zwiększają masę systemu, a mają większą sprawność.

W celu analizy różnych typów elastycznych modułów PV zebrano specyfikacje techniczne, korzystając z arkuszy danych producentów i przeanalizowano je pod kątem zastosowania na pokładzie pojazdu. W analizie uwzględniono ponad 16 czołowych producentów półelastycznych modułów PV. Spośród produkowanych modeli danego producenta wybrano moc znamionową modułu z zakresu 90–150 W, przyjmując kryterium jak największej oferowanej mocy. Podane przez producenta wartości znamionowe mocy modułu PV dotyczą standardowych warunków testowych (STC) (natężenie promieniowania słonecznego 1000 W/m^2 , przy 25°C). Dodatkowo do porównania dodano panel fotowoltaiczny z ramą pokryty szkłem, osiągający maksymalną sprawność dostępną na rynku sztywnych paneli fotowoltaicznych w 2020 roku. Na rycinie 10.9 przedstawiono gęstość mocy i moc właściwą dla poszczególnych modułów PV różnych producentów. Gęstość mocy jest to moc maksymalna modułu uzyskana z jednostki powierzchni, wyrażona w jednostkach $[\text{W/m}^2]$. Jej wartość uzyskuje się, dzieląc moc maksymalną modułu przez jego całkowitą powierzchnię. Moduły o większej gęstości są preferowane w przypadku pojazdów o ograniczonej powierzchni. Uzyskuje się wtedy dużą moc systemu PV przy małej powierzchni. Średnio (czarna linia przerywana) w przypadku modułów półelastycznych na 1 m^2 przypada około 150 W. Moduły oparte na ogniwach firmy SunPower typu Back Contact i wyposażone w wąskie puszkі przyłączeniowe (*junction box*), niezajmujące powierzchni modułu, mają moc nawet 185 W z jednego metra kwadratowego. Oznacza to, że do zbudowania systemu fotowoltaicznego o mocy 1 kW wymagana jest na pojeździe powierzchnia

poniżej $5,5 \text{ m}^2$. W przypadku zastosowania modułów sztywnych z szybą, które mają puszki przyłączeniowe pod ramą i nawet 400 W mocy, wartość gęstości mocy wynosi 226 W/m^2 . W przypadku zastosowania tego rodzaju paneli w pojazdach ich grubość oraz masę własną eliminuje sztywna i o dużej powierzchni rama. Dodatkowo parametr ten jest uzyskiwany przy dużych powierzchniach. W przypadku analizowanego modułu SunPower Maxeon 3 wynosi $1,89 \text{ m}^2$.

Moc właściwa wyrażona w jednostkach W/m^2 jest definiowana jako maksymalna moc modułu PV przypadająca na jednostkę masy i wyrażona w jednostkach $[\text{W/kg}]$. Jej wartość uzyskuje się, dzieląc moc maksymalną modułu przez jego całkowitą masę. W przypadku stosowania w pojazdach masa właściwa modułu PV powinna być duża, ponieważ montaż modułów PV zwiększy masę własną pojazdu, co ma wpływ na jego osiągi. Średnio (czerwona linia przerywana na rycinie 10.9) w przypadku modułów półelastycznych na 1 kg przypada około 47 W . Moduły firmy Mia Sole oparte na ogniwach typu CIGS, umieszczone na lekkim i cienkim podłożu, niezajmujące powierzchni modułu, osiągają moc nawet 75 W z jednego metra kwadratowego. Oznacza to, że do zbudowania systemu fotowoltaicznego o mocy 1 kW wymagana jest dodatkowa masa na pojeździe poniżej 18 kg . W przypadku panelu sztywnego stosowanego do budownictwa i farm fotowoltaicznych masa wynosi 47 kg/kW .



Ryc. 10.9. Gęstość mocy i moc właściwa dla poszczególnych półelastycznych modułów fotowoltaicznych w porównaniu do najlepszego modułu sztywnego, szklanego

10.3.4. Certyfikacja systemu i dopuszczenie do ruchu

Moduły fotowoltaiczne zintegrowane z pojazdem stanowią zarówno część systemu fotowoltaicznego, jak i składniki pojazdów. Produkt będzie testowany i oceniany według dwóch standardów. Na przykład wydajność modułu fotowoltaicznego będzie musiała zostać zweryfikowana jako system fotowoltaiczny, uwzględniając niezbędne korekty związane z różnymi warunkami użytkowania, takimi jak ruch, częste zacienianie itp. Jednocześnie moduł będzie poddawany testom jako element zewnętrzny pojazdów, na przykład różnego rodzaju szkło. Będzie również testowany jako element elektryczny pojazdu. Standardowe moduły fotowoltaiczne są instalowane tak, aby unikać zacieniania podczas montażu. Jednak moduły PV na dachu pojazdu nie są skierowane optymalnie dla wykorzystania energii słonecznej. Preferencje parkowania kierowcy często mogą prowadzić do zacienienia modułów fotowoltaicznych.

Relatywna orientacja modułów fotowoltaicznych na pojeździe względem pozycji Słońca nie jest stała, lecz często zmienia się podczas jazdy. Panele fotowoltaiczne na karoserii i dachu pojazdu są zakrzywione, co często powoduje zacienianie przez własne powierzchnie. Dlatego też metodyka analizy wydajności musi zostać przebudowana. Obecnie nie istnieje opublikowany standard ani żadne zapisy publikacji oficjalnych działań dotyczących standaryzacji międzynarodowej. Aby ustalić standardy dla naświetlania słonecznego i projektowania modułów dla pojazdów zasilanych energią słoneczną, konieczne będzie zajęcie się testami oceny, kwalifikacją projektu, modelowaniem mocy i prognozowaniem energii. Należy rozważyć następujące kwestie związane z pojazdem: większe ryzyko zacieniania przez obiekty wokół pojazdu (drzewa i budynki), zakrzywiona powierzchnia, zmienne kąty orientacji oraz utrata dopasowania przez częściowe zacienianie.

10.3.5. Analiza ekonomiczna

Czas zwrotu kosztu poniesionego na zakup fotowoltaicznej instalacji autobusowej zależy od: ceny jednostkowej systemu i jego sprawności, zużycia energii elektrycznej przez pojazd oraz sposobu eksploatacji pojazdu (styl jazdy kierowcy, przebieg pojazdu w okresie występowania promieniowania słonecznego, występowanie zacienień), który ma bezpośredni wpływ na ilość energii elektrycznej wygenerowanej przez system PV.

Do analizy ekonomicznej należy brać pod uwagę skrajnie niekorzystne warunki pracy pojazdu (małe napromieniowanie ze względu na zacienianie

i sposób eksploatacji, niskie zużycie energii elektrycznej i jej produkcja przez system PV).

Pomimo dużego zapotrzebowania na energię elektryczną na pokładzie autobusu moc systemu fotowoltaicznego jest ograniczona powierzchnią dachu autobusu i paneli fotowoltaicznych (odpowiednio $6 \text{ m}^2/\text{kWp}$ i $4,4 \text{ m}^2/\text{kWp}$ dla elastycznych i sztywnych). Sposobem na zwiększenie mocy systemu jest zastosowanie sztywnych paneli fotowoltaicznych o większej sprawności, które nie zawsze są możliwe do zamontowania. Pozostają do dyspozycji kosztowne panele elastyczne o niskiej sprawności (18%) w porównaniu do paneli sztywnych.

Na dachu 18-metrowego autobusu 311 zmierzono, że roczna suma natężenia napromieniowania całkowitego wyniosła 639 kWh/m^2 , co stanowiło o 42% mniej niż wartości zarejestrowane na budynku. Dla porównania w modelach Ideal1 i Ideal2 było to odpowiednio o 19% i 31% mniej. W tym samym czasie autobusowy system fotowoltaiczny o mocy $1,08 \text{ kWp}$ ($6,5 \text{ m}^2$) wyprodukował 398 kWh energii elektrycznej i w każdym miesiącu produkcja była poniżej wartości zapotrzebowania (ryc. 10.5). Najniższe zużycie energii elektrycznej dla pojazdu wyniosło 71 Wh/km (rocznie około $3,9 \text{ MWh}$) przy rocznym przebiegu o wartości 55 tys. km. Rzeczywista sprawność systemu wyniosła poniżej 10,5%, a roczna produkcja zielonej energii 368 kWh/kWp . Do wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej na pokładzie autobusu z silnikiem spalinowym zużywa się $0,5 \text{ dm}^3$ oleju napędowego, co w analizowanym przypadku daje oszczędności na poziomie $184 \text{ dm}^3/\text{rok}$ (1100 zł/rok , uwzględniając koszt oleju napędowego na poziomie 6 zł [222]).

Koszt sztywnych paneli fotowoltaicznych to około $0,60 \text{ zł/Wp}$, a elastycznych $2,2 \text{ zł/Wp}$ [167]. Do tego należy doliczyć koszt okablowania PV, wiązki elektrycznej autobusowej oraz sterownika w kwocie około 1800 zł/kWp . Można założyć, że montaż systemu zostanie przeprowadzony przez pracowników przedsiębiorstwa, do którego należy pojazd, więc będzie bezpłatny. W rezultacie koszt jednostkowy systemu PV zbudowanego z elastycznych paneli o mocy 1 kWp wyniesie maksymalnie 4000 zł (4 zł/Wp). Czas potrzebny na zwrot kosztów poniesionych na system zawrze się w przedziale 3,5–4 lata.

Podobne analizy przeprowadzili autorzy pracy [89]. System PV o mocy $1,8 \text{ kW}$ w autobusie miejskim zapewnił 26% zapotrzebowania na energię elektryczną autobusu. Szacowany okres zwrotu dla tej instalacji wyniósł 3 lata (3-procentowa redukcja zużycia paliwa). W pracy [226] przedstawiono analizę redukcji zużycia paliwa po zastosowaniu w 18-metrowym autobusie miejskim z silnikiem spalinowym systemu fotowoltaicznego o mocy $2,8 \text{ kWp}$. System złożony był z elastycznych paneli fotowoltaicznych o mocy 16% i pozwolił

teoretycznie oszczędzić w ciągu roku 628 dm³ oleju napędowego. Uwzględniając koszt oleju napędowego na poziomie 6 zł [222], roczne oszczędności wyniosły 3768 zł. Autobusowy system fotowoltaiczny zwróci się po około 3,5 roku użytkowania.

Ze względów praktycznych ważne jest to, że w miesiącach jesienno-zimowych system PV doładowuje akumulatory rozruchowe i zasila odbiorniki pokładowe podczas postoju. Zwiększa się trwałość akumulatorów oraz zmniejsza liczba operacji serwisowych wywołanych koniecznością awaryjnego uruchomienia pojazdu ze względu na rozładowany akumulator.

11. Podsumowanie i wnioski

11.1. Główne wnioski z przeprowadzonych badań

Zidentyfikowano konieczność wprowadzenia dodatkowego, ekologicznego źródła energii elektrycznej w autobusach miejskich, gdzie pierwotne źródło energii stanowi paliwo zgromadzone w zbiornikach lub energia elektryczna zgromadzona w akumulatorach. Wynika to z rosnącego zapotrzebowania na paliwa kopalne oraz energię elektryczną na pokładzie autobusu, co z kolei prowadzi do zwiększonej emisji CO₂ i innych substancji toksycznych. Dotyczy to zarówno autobusów napędzanych silnikiem spalinowym, jak i elektrycznym. Sprawność wytwarzania energii elektrycznej w autobusach z silnikiem spalinowym wynosi poniżej 20%, a łączna moc odbiorników elektrycznych dochodzi do 5,6 kW. Do wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej na pokładzie autobusu z silnikiem spalinowym zużywa się od 0,33 do ponad 0,5 dm³ oleju napędowego.

Sektor transportu autobusowego i ciężarowego wprowadza technologie oszczędzające paliwo. Wykorzystanie energii słonecznej poprzez zastosowanie paneli fotowoltaicznych na dachu autobusu pozwala nie tylko zredukować negatywne skutki wykorzystania paliw kopalnych, ale także zwiększyć zasięg pojazdu.

Literatura wskazuje na liczne badania dotyczące generowania energii elektrycznej z modułów fotowoltaicznych i jej zastosowania w motoryzacji (pojazdy

elektryczne, hybrydowe oraz z silnikiem spalinowym). Na Ziemi Słońce jest podstawowym źródłem energii odnawialnej. Systemy fotowoltaiczne i solarne przekształcają promieniowanie słoneczne bezpośrednio w energię użytkową. W Polsce średnia suma natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą wynosi 990 kWh/m^2 , z czego 50% stanowi promieniowanie rozproszone, co zmniejsza efekt zacienienia dachu pojazdu w obszarze miejskim.

Przeprowadzone badania pozwoliły na poczynienie poniższych spostrzeżeń:

1. **Wpływ warunków atmosferycznych na wydajność modułów PV:**

Warunki atmosferyczne, takie jak temperatura otoczenia, prędkość wiatru oraz wilgotność powietrza, mają istotny wpływ na wydajność modułów fotowoltaicznych zainstalowanych na dachach autobusów miejskich. Na przykład średnia moc systemu 1 kWp z elastycznych paneli monokrystalicznych wynosi $981,5 \text{ W}$ przy temperaturze 75°C , podczas gdy dla sztywnych paneli monokrystalicznych wynosi $985,5 \text{ W}$ dzięki chłodzeniu opływającym powietrzem.

2. **Ruchomy charakter źródła energii słonecznej:**

Dynamiczne zmiany nasłonecznienia związane z ruchem pojazdu po terenie miejskim powodują fluktuacje w ilości energii słonecznej docierającej do modułów PV. W badaniach przeprowadzonych na dachu autobusu 311 stwierdzono, że całkowita roczna suma natężenia napromieniowania całkowitego wyniosła 639 kWh/m^2 , co stanowiło 58% docierającego napromieniowania do dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej.

3. **Wykorzystanie promieniowania rozproszonego i odbitego:**

Autobusy poruszające się po ulicach miasta mogą korzystać z dodatkowego źródła energii słonecznej pochodzącego z promieniowania rozproszonego i odbitego od budynków i innych obiektów infrastruktury miejskiej. Średnie miesięczne sumy natężenia promieniowania słonecznego rozproszonego były większe w warunkach słabego nasłonecznienia, co wskazuje na znaczącą rolę promieniowania rozproszonego w miejskich warunkach. Promieniowanie rozproszone oraz odbite od budynków i infrastruktury miejskiej znacząco przyczynia się do produkcji energii przez moduły PV. Na przykład wartości dziennego napromieniowania uzyskane z pyranometrów były większe niż uzyskane ze zdjęć satelitarnych PVGIS w warunkach słabego nasłonecznienia, co pokazuje wpływ miejskiej infrastruktury na efektywność systemów PV.

4. **Ekonomiczne i ekologiczne korzyści systemu PV:**

Zastosowanie systemów fotowoltaicznych na dachach autobusów miejskich przyczynia się do zmniejszenia zużycia paliw kopalnych oraz redukcji emisji CO_2 i innych zanieczyszczeń. W badaniach wykazano, że zastosowanie

systemów PV może zmniejszyć emisję CO₂ nawet o około 29%, co przyczynia się do bardziej zrównoważonego rozwoju transportu publicznego. Koszt autobusowego systemu fotowoltaicznego zwraca się maksymalnie po 3,5 roku i pozwala oszczędzić rocznie 184 dm³ oleju napędowego przy zainstalowanej mocy o wartości 1 kWp.

5. **Aspekty techniczne montażu i integracji systemu PV:**

Montaż elastycznych paneli fotowoltaicznych na dachach autobusów odpowiada potrzebie uwzględnienia specyficznych warunków eksploatacyjnych, takich jak drgania i naprężenia mechaniczne. W badaniach wykazano, że moduły monokrystaliczne miały najmniejszy spadek mocy maksymalnej przy wzroście temperatury, wynoszący -0,37%/°C, co jest korzystne w zmieniających warunkach eksploatacyjnych.

Aplikacja PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), wykorzystująca dane satelitarne do szacowania promieniowania słonecznego, może zastąpić pomiary za pomocą czujników napromieniowania i posłużyć do porównywania z danymi zbieranymi przez czujniki nasłonecznienia na poruszających się obiektach. Prosta metoda identyfikacji warunków bezchmurnych (promieniowanie bezpośrednie) polega na porównaniu indeksu przejrzystości atmosfery. W badanym obszarze warunki takie wystąpiły przez 25 dni w roku.

Opracowany model matematyczny przebiegu czasowego oświetlenia dachu autobusu bazował na 12-miesięcznych pomiarach 4 autobusów (3 mln punktów pomiarowych). W podmodelu Ideal1 szereg czasowy sumy natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowanie) zbudowano, wybierając maksymalne wartości napromieniowania w danym dniu z 4 autobusów. W podmodelu Ideal2 kryterium wyboru była maksymalna dzienna wartość napromieniowania i przebieg powyżej 50 km.

Średnia prędkość komunikacyjna autobusu w podmodelu Ideal2 wyniosła 17,3 km/h rocznie. Szereg czasowy prędkości komunikacyjnej, temperatury otoczenia i natężenia promieniowania słonecznego pozwolił wyznaczyć średnią teoretyczną moc systemu PV na dachu autobusu. W warunkach rzeczywistych średnia moc maksymalna instalacji na dachu budynku wynosiła 497 W. W modelu Ideal1, uwzględniającym maksymalne nasłonecznienie i temperaturę ogniwa, moc maksymalna wynosiła średnio 460 W, a w modelu Ideal2, przy największym zacienieniu instalacji, 411 W.

Roczna suma natężenia promieniowania słonecznego w modelach Ideal1 i Ideal2 wyniosła odpowiednio 890 kWh/m² i 755 kWh/m², co stanowiło odpowiednio o 19% i 31% mniej niż wartości zarejestrowane na budynku

(1095 kWh/m²). Linie trendu poprowadzone przez zbiory punktów pomiarowych potwierdziły te wartości.

Monokrystaliczne fotowoltaiczne ogniwa krzemowe osiągają w warunkach laboratoryjnych sprawność 26%, a moduły fotowoltaiczne pokryte szkłem osiągają maksymalną sprawność 22,6%. Najlepsze moduły półelastyczne osiągają sprawność 18%. By zainstalować 1 kWp mocy, potrzeba 6,1 m² modułów półelastycznych i 4,4 m² modułów sztywnych.

Zużycie energii elektrycznej dla autobusów 12- i 18-metrowych wynosiło odpowiednio 71 Wh/km i 90 Wh/km, co przekładało się na roczne zapotrzebowanie 3,9 MWh i 5,6 MWh. System fotowoltaiczny zastąpił odpowiednio 10% (398 kWh) i 27% (1261 kWh) energii produkowanej z paliwa, redukując zużycie paliwa o 201 dm³ (autobus 12-metrowy) i 637 dm³ (autobus 18-metrowy). System fotowoltaiczny nie pracował z układem MPPT.

Autobus elektryczny z systemem PV o sprawności 18% i powierzchni 25 m² może zwiększyć zasięg średnio o 8 km rocznie, a maksymalnie przy dużym nasłonecznieniu nawet o 27 km. Ze względów praktycznych ważne jest to, że w miesiącach jesienno-zimowych system PV doładowuje akumulatory rozruchowe i zasila odbiorniki pokładowe podczas postoju.

11.2. Potencjalne kierunki dalszych badań

Istnieje potrzeba dalszych badań nad wpływem warunków eksploatacyjnych na wydajność systemów fotowoltaicznych, w tym analiza różnych szerokości geograficznych i wpływu różnych konfiguracji montażowych. Badania powinny również obejmować opracowanie zaawansowanych modeli matematycznych uwzględniających dynamiczne warunki nasłonecznienia w miejskich środowiskach. Dalszy rozwój tematyki powinien obejmować badania:

- nierównomierności i zaciniania w różnych szerokościach geograficznych, w tym energii słonecznej docierającej do powierzchni bocznych autobusu,
- stopnia zwiększenia natężenia promieniowania słonecznego (napromieniowania) z powodu odbić w aglomeracji miejskiej,
- użycia paneli sztywnych ze szkłem oraz ich wpływ na aerodynamikę pojazdu i chłodzenie,
- mikropełnięć i zmniejszania sprawności paneli fotowoltaicznych wskutek drgań dachu autobusu wraz z dobozem elementów tłumiących drgania,

- układów sterowania systemami fotowoltaicznymi opartymi na MPPT, ze względu na fluktuacje napromieniowania pochodzące od cieni budynków,
- uniwersalnego urządzenia rejestrującego dane o napromieniowaniu oraz zużyciu energii elektrycznej na pokładzie autobusu,
- modelu matematycznego nagrzewania systemu fotowoltaicznego na dachu autobusu,
- modelu logistycznego systemu transportu autobusowego pozwalającego na optymalny udział autobusów z systemem PV w stosunku do ich ogólnej liczby na trasach o minimalnym zacienieniu,
- możliwości wykorzystania systemów fotowoltaicznych na autobusach jako składowych farmy fotowoltaicznej na zajezdni autobusowej (Vehicle to Grid – V2G).

Konieczny jest również rozwój infrastruktury ładowania zasilanej PV, co powinno obejmować analizę warunków maksymalizacji korzyści z PV dla pojazdów zaparkowanych poza cieniem stacji. Wytwarzanie energii PV w czasie rzeczywistym podczas postoju pojazdu na zajezdni może znacząco zwiększyć efektywność wykorzystania energii odnawialnej. Dalsze prace rozwojowe stacji ładowania zasilanych PV powinny skupić się na problemach i propozycjach ich rozwiązania, wykonaniu studium wykonalności oraz możliwych dodatkowych usługach V2G oferowanych przez takie stacje.

Załączniki

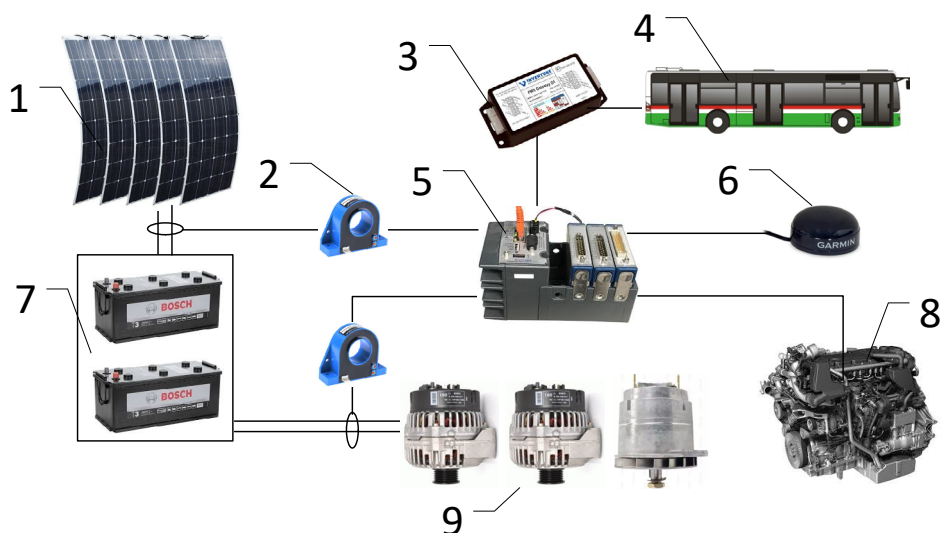
Z1. Autobusowy system pomiarowy

Na rycinie Z.1 przedstawiono schemat systemu pomiarowego zamontowanego na autobusach. Opracowany system pomiarowy składa się z układu rejestracji danych, przetworników prądowych, systemu transmisji Profibus oraz odbiornika GPS. Ponadto system był stale podłączony do komórkowej transmisji danych za pomocą modułu z kartą SIM. Rejestrowane dane były przesyłane i zapisywane na dysku twardym komputera.

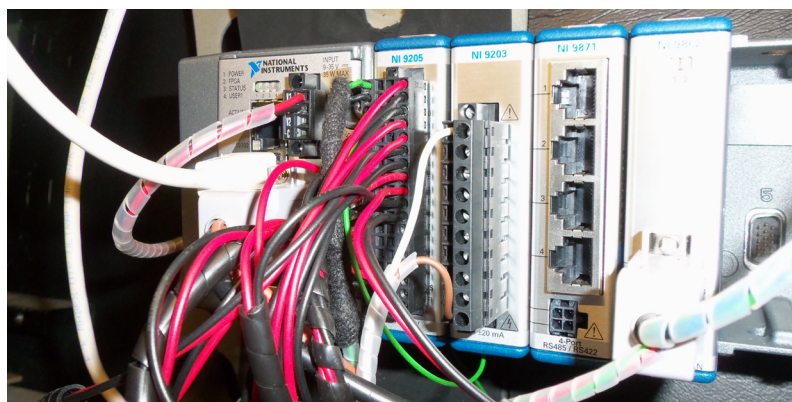
Badane autobusy zostały wyposażone w system rejestracji, akwizycji i analizy danych w czasie rzeczywistym CompactRIO cRIO-9024 firmy National Instruments. System składa się z uniwersalnego modułu obsługi kart pomiarowych NI-9145 na 8 slotów z zasilaczem, z kontrolera czasu rzeczywistego NI cRIO-9024, interfejsu CAN NI 9862, interfejsu RS485/RS422 NI 9871, z modułu pomiarowego natężenia prądu NI 9203 oraz napięcia NI 9205. Wszystkie elementy są zgodne ze środowiskiem oprogramowania LabVIEW i mogą pracować w zakresie temperatur pracy od 0°C do +55°C. Dodatkowo mają uchwyty montażowe do zamontowania na szynie DIN oraz na stole badawczym. Układy zamontowano w przestrzeni pasażerskiej poszczególnych autobusów (ryc. Z.2).

W pojedynczym autobusie zamontowano indukcyjne przetworniki prądowe serii HTR do monitorowania i rejestracji napięcia (U) oraz natężenia prądu (I) w poszczególnych częściach hybrydowej instalacji elektrycznej na

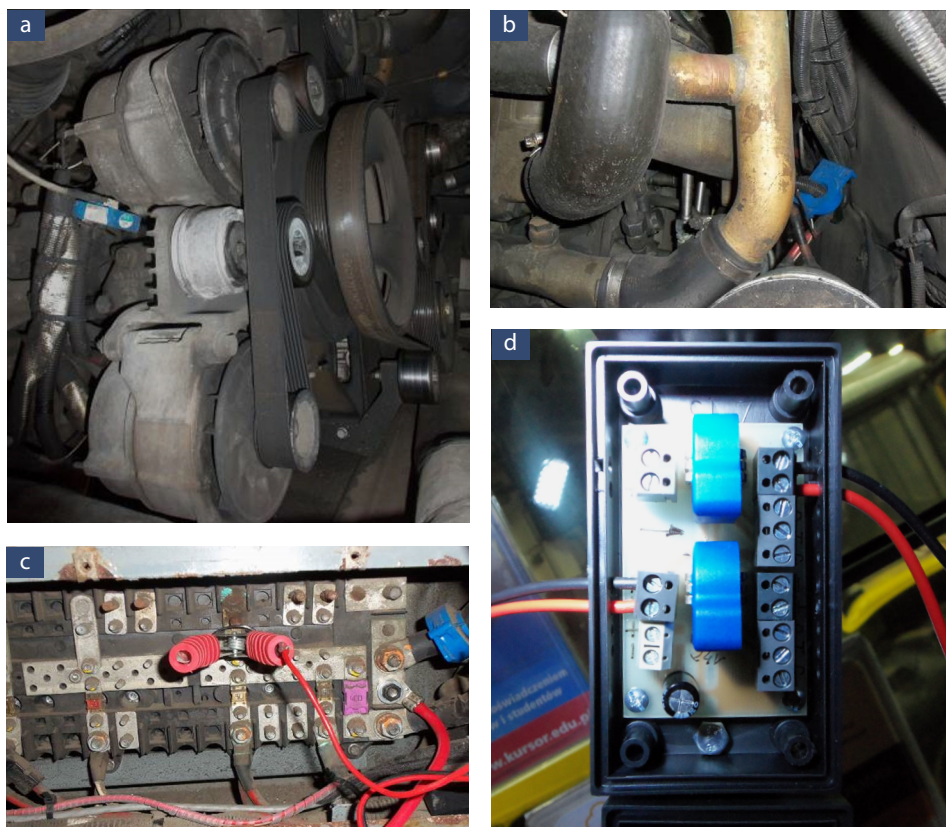
przewodzie wychodzącym z zespołu alternatorów – pomiar całkowitej ilości produkowanej i zużywanej energii elektrycznej przez autobus oraz na przewodzie wychodzącym z akumulatorów – pomiar całkowitej ilości energii elektrycznej produkowanej przez system fotowoltaiczny na pokładzie autobusu. Dodatkowo przetworniki prądowe zostały zamontowane na przewodach wychodzących z poszczególnych sekcji z systemu fotowoltaicznego. Na rycinie Z.3 przedstawiono miejsca montażu czujników. Pomiary te pozwoliły obliczyć ilość energii elektrycznej wytwarzanej i zużywanej na pokładzie danego autobusu.



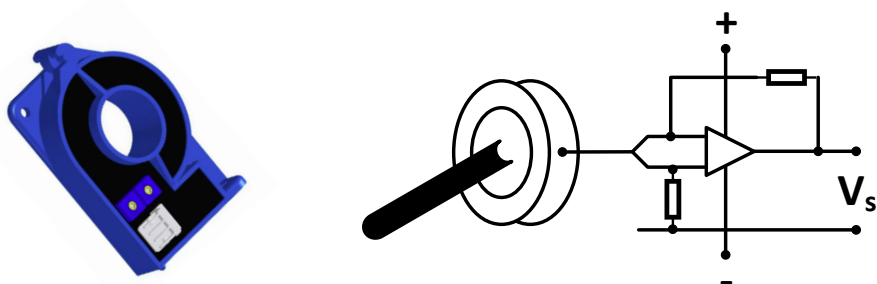
Ryc. Z.1. Schemat systemu pomiarowego. 1 – system fotowoltaiczny, 2 – przetwornik prądowy, 3 – system transmisji Profibus, 4 – autobus, 5 – układ rejestracji danych, 6 – odbiornik GPS, 7 – akumulatory 24 V, 8 – silnik spalinowy, 9 – układ alternatorów



Ryc. Z.2. Układy pomiarowe oparte na NI Compact RIO zamontowany na testowanych autobusach [173]



Ryc. Z.3. Przetworniki prądowe HTR 300-SB zamontowane na przewodzie wychodzącym z połączonych ze sobą dwóch małych alternatorów (a), na przewodzie wychodzącym z dużego alternatora (b), na przewodzie wychodzącym z zespołu alternatorów i z akumulatora (c), do pomiaru wartości natężenia prądu z poszczególnych sekcji systemu fotowoltaicznego (d) [173]



Ryc. Z.4. Przetwornik prądowy serii HTR oraz schemat zasady jego działania

Przetworniki elektryczne firmy LEM transformują prąd pierwotny na izolowany galwanicznie sygnał proporcjonalny do wartości chwilowej lub skutecznej tego prądu w szerokim paśmie częstotliwości od 0 do 800 kHz. Stosowane są do pomiaru prądów stałych i zmiennych do 20 kA (do zastosowań przemysłowych i trakcji elektrycznej). Są to bezinwazyjne czujniki do pomiaru prądu stałego i zmiennego w zakresie prądów od 1 mA do 500 kA oraz do pomiaru napięć stałych i zmiennych w paśmie częstotliwości od 0 do kilkuset kHz. Uzyskiwany w wyniku pomiaru sygnał jest odseparowany od obwodów pierwotnych i może służyć do oceny z podaną dokładnością wartości mierzonej lub do sterowania urządzeń energoelektronicznych. Strumień magnetyczny wytworzony przez prąd pierwotny skupia się w rdzeniu magnetycznym w szczelinie, w której umieszczona jest płytki Halla (ryc. Z.4.). Napięciowy sygnał wyjściowy z czujnika Halla po wzmocnieniu w układzie elektronicznym odpowiada chwilowej wartości prądu pierwotnego. Podstawowe parametry czujników LEM serii HTR przedstawia tabela Z.1.

Tab. Z.1. Podstawowe parametry przetworników LEM serii HTR [49]

Parametry	Wartości
Zakres natężenia prądu wejściowego [A]	+/-800
Napięcie zasilania [V]	12–15
Typ transformatora	rdzeń rozdzielony
Maksymalna średnica kabla [mm]	21
Typ czujnika	efekt Halla z otwartą pętlą
Typ montażu	moduł, szyna
Pasma częstotliwości [kHz]	do 10
Dokładność [%]	+/- 2
Minimalna temperatura robocza [°C]	-10
Maksymalna temperatura robocza [°C]	+70
Połączenia obwodu wtórnego	MOLEX 5046-04/AG

Rejestrowana transmisja diagnostyczna Profibus z autobusu dostarczała takich informacji jak: prędkość obrotowa wału korbowego silnika, zużycie paliwa na godzinę, prędkość pojazdu, położenie pedału przyspieszenia (APP). Protokół komunikacyjny sieci Profibus jest zdefiniowany przez normę DIN 19245, która opisuje aspekt fizyczny, liniowy i aplikacyjny siedmiowarstwowego modelu ISO/OSI. Konkretnie informacje zostały odczytane za pomocą specjalnego oprogramowania, tj. interfejsu zdolnego do konwersji danych dostarczanych przez standardową transmisję Fieldbus Message Specification (FMS) na

dane możliwe do zapisania w postaci pliku zgodnie z modelem danych TDMS (Binary LabVIEW Measurement File). W związku z tym udało się zmniejszyć przestrzeń do zapisu pomiarów, dzięki czemu wyniki zostały przeanalizowane w NI DIAdem. Rejestrowane były również z autobusu następujące parametry: trasa, obciążenie, czas pracy, temperatura silnika, temperatura otoczenia.

Rejestrację danych i wstępną obróbkę realizowano z wykorzystaniem oprogramowania pomiarowego oraz do analizy wyników badań opracowanych w środowisku LabView 8.1 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), będącym produktem firmy National Instruments Corporation. Kod źródłowy LabVIEW sprowadza się do graficznego przedstawienia operacji funkcji *wejścia* (z przyrządów i klawiatury) i *wyjścia* (na ekran, drukarkę i przyrządy). Dowolny wirtualny przyrząd pomiarowy można zapisać w języku graficznym G w postaci ikon, zacisków i połączeń. Wykorzystano rozbudowane biblioteki podprogramów i funkcji do większości zadań programistycznych.

Program do obróbki danych zapisanych w formacie *tdm zawierał dwa okna: Front Module – pełniący rolę interfejsu użytkownika i Block Diagram – zawierający graficzny kod programu. Moduł frontowy jest zbudowany przy pomocy kontrolerek i wskaźników, które są odpowiednio wejściowym i wyjściowym terminalem programu. Diagram blokowy składa się z terminali, funkcji, struktur i przewodów. Terminale są wejściowymi i wyjściowymi portami wymieniającymi informacje pomiędzy modulem frontowym a diagramem blokowym. Funkcje to programy, które jako wynik zwracają jedną lub więcej wartości.

Analizę danych przeprowadzono za pomocą skryptów napisanych w programie NI DIAdem Professional Edition, który przeznaczony jest do prac naukowych oraz inżynierskich w celu szybkiej lokalizacji, analizy oraz raportowania wyników pomiarów przy użyciu tylko jednego narzędzia. Program umożliwił analizowanie wyników symulacji podczas generowania sygnałów. Pozwala operować na plikach dużej objętości w wielu różnych formatach oraz na zestawieniach wyników z różnych lokalizacji, stworzonych w różnych odstępach czasu i mających różną liczbę danych. Dzięki temu możliwe było tworzenie wykresów porównujących tylko jeden wybrany parametr. DIAdem umożliwił również eksport danych oraz zapis dokonanych zestawień i analiz.

Z2. Skrypt do obliczania sumy natężenia promieniowania słonecznego

```
Option Explicit 'Forces the explicit declaration of all the variables in a script.
Dim i, X, k
Call Data.Root.Clear()
If FileDlgShow(DataReadPath,"TDMS Files","*.tdms","DataSelection",True) = "IDOk" Then
For i = 0 to UBound(FileDlgNameList)
,należy zmienić numer kanału odczytując other w number' 24 autobusy, 16 pollub
    Call Data.FileLoadSel(FileDlgNameList(i),"",[1]/[24])
X = Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("E").Properties("sourcedatafilename").Value
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("E").Name = "E_"&X
,funkcja polinomial 2 i uśrednianie 20' - na razie zdezaktywowana przez Ef
'Set ChnResult = ChnSavitzkyGolayFilter("[1]/E_"&X,"/Ef_"&X,2,20)'
,skalowanie oraz odejmowanie -9'
Set ChnResult = ChnLinScale(,"[1]/E_"&X,"/maxE_"&X,0.5,-4)
Set ChnResult = ChnSum("[1]/maxE_"&X,"/maxE_"&X)
Dim max, maxsc
max = Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("maxE_"&X).Maximum
maxsc = max / 3600000
'msgbox(maxsc)
Call Data.Root.ChannelGroups(1).Channels.Add("maxEn_"&X,DataTypeFloat64)
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("maxEn_"&X).SetValues(maxsc)
' Call Data.Root.ChannelGroups(1).Channels.Remove("Ef_"&X)
Call Data.Root.ChannelGroups(1).Channels.Remove("maxE_"&X)
Next
End if
Dim z, a, c
a = Data.Root.ChannelGroups(1).Channels.Count
c = a + 1
Call Data.Root.ChannelGroups(1).Channels.Add("zest",DataTypeFloat64,c)
for z = 2 to a step 2
    Call ChnConcat(,"[1]/[„ & z & „]", "[1]/[„& c & „]")
Next
```

Z3. Skrypt do analizy plików autobusowych

Option Explicit

```
Dim i
If FileDlgShow(DataReadPath,"TDMS Files","*.tdms","DataSelection",True) = "IDOk" Then
For i = 0 to UBound(FileDlgNameList)
Call Data.Root.Clear()
Call Data.FileLoad(FileDlgNameList(i),"TDMS","Load")
Call ChnLinGenImp("Time_s",115200,1,0.499995659684546,"")
Call ChnGenTime("/
    Czas","millisecond",6.35630292E+10,6.35630868E+10,500,"StartStepEnd",115199)
,-----
```

,Filtrowanie sygnału z czujników prądowych
Call ChnSmooth("[1]/I_AK","I_AK",10,"symmetric")
Call ChnSmooth("[1]/I_ALT","I_ALT",10,"symmetric")
,Zerowanie sygnałów prądowych
,Call ChnOffset("[1]/I_ALT","I_ALT",-1.3,"free offset")
,Filtrowanie sygnału napięcia i przeliczanie
Call ChnSmooth("[1]/U","I/U",10,"symmetric")
Call ChnLinScale("[1]/U","I/U",1.333333,0)
,obliczenia mocy alternatora
'("Ch("Group3/Result")
Call Calculate ("Ch("[1]/I_ALT+"))=Ch("[1]/I_ALT")-CTNV(Ch("[1]/I_ALT")<0)")
Call ChnMul("[1]/I_ALT+","I/U","2]/P_ALT")
,obliczenia mocy akumulatora
Call Calculate ("Ch("[1]/I_AK-"))=Ch("[1]/I_AK")-CTNV(Ch("[1]/I_AK")>0)")
Call ChnLinScale("[1]/I_AK-","I/U",-1,0)
Call ChnMul("[1]/I_AK-","I/U","2]/P_AK-")
Call ChnLinScale("[2]/P_AK-","2]/E_AK-",0.5,0)
Call ChnSum("[2]/E_AK-","2]/E_AK-")
Call ChnLinScale("[2]/E_AK-","2]/E_AK-",2.77777777777778e-4,0)
Call Calculate ("Ch("[1]/I_AK+"))=Ch("[1]/I_AK")-CTNV(Ch("[1]/I_AK")<0)")
Call ChnMul("[1]/I_AK+","I/U","2]/P_AK+")
'Call Calculate ("Ch("[2]/I_AK")=Ch("[1]/I_AK+")+(Ch("[1]/I_AK-"))
Call ChnLinScale("[2]/P_AK+","2]/E_AK+",0.5,0)
Call ChnSum("[2]/E_AK+","2]/E_AK+")
Call ChnLinScale("[2]/E_AK+","2]/E_AK+",2.77777777777778e-4,0)
,Ch("[1]/I_ALT+"))=Ch("[1]/I_ALT")-CTNV(Ch("[1]/I_ALT")<0)
,Obliczenie energii instalacji elektrycznej autobusu
Call ChnLinScale("[2]/P_ALT","2]/E_ALT",0.5,0)
Call ChnSum("[2]/E_ALT","2]/E_ALT")
Call ChnLinScale("[2]/E_ALT","2]/E_ALT",2.77777777777778e-4,0)
,Obliczenie energii ze słońca
,Call ChnLinScale("[1]/E","2]/E_słońca",0.5,0)
Call ChnSum("[1]/E","2]/E_słońca")
Call ChnLinScale("[2]/E_słońca","2]/E_słońca",2.77777777777778e-4,0)
,Obliczenie energii z paneli
Call ChnMul("[1]/I_1","I/U","2]/P_PV1")
Call ChnLinScale("[2]/P_PV1","2]/E_PV1",0.5,0)
Call ChnSum("[2]/E_PV1","2]/E_PV1")
Call ChnLinScale("[2]/E_PV1","2]/E_PV1",2.77777777777778e-4,0)

Call ChnMul("[1]/I_2","I/U","2]/P_PV2")
Call ChnLinScale("[2]/P_PV2","2]/E_PV2",0.5,0)
Call ChnSum("[2]/E_PV2","2]/E_PV2")
Call ChnLinScale("[2]/E_PV2","2]/E_PV2",2.77777777777778e-4,0)

,Obliczenie sprawności przetwarzania energii na I2
Call ChnLinScale("[2]/P_PV2","P_PV2_m2",0.0988142292490119,0)
Call ChnDiv("[1]/P_PV2_m2","I/E","/Spr_I2")
,Obliczenie przebiegu km i zużycia paliwa
Call Calculate ("Ch("[2]/Przebieg")=Ch("[1]/Przebieg")-CTNV(Ch("[1]/

```

Przebieg")=0")
Call Calculate("Ch(""[2]/Total_zu_ON")=Ch(""[1]/Total_zu_ON")-CTNV(Ch(""[1]/
Total_zu_ON")=0")
'Czas pracy silnika
Call ChnQuantize("[1]/n","[2]/Quantized",256,1,0)
Call Calculate("Ch(""[2]/Quantizedbez zer")=Ch(""[2]/Quantized")-CTNV(Ch(""[2]/
Quantized")<0.9),NULL,NULL,"")
Call ChnSum("[2]/Quantizedbez zer","[2]/Sum")
Call ChnLinScale(",[2]/Sum","[2]/Czas całkowity pracy silnika",0.0001388888888889,0)
Call Data.Root.ChannelGroups(2).Channels.Remove("Quantized")
Call Data.Root.ChannelGroups(2).Channels.Remove("Quantizedbez zer")
Call Data.Root.ChannelGroups(2).Channels.Remove("Sum")
Dim l
For l = 1 to 22
StatSel(l) = "No"
Next
StatSel(5) = "Yes" 'Maximum
Call StatBlockCalc("Channel", "1-","E_PV1")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "E_PV1_max"
Call StatBlockCalc("Channel", "1-","E_PV2")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "E_PV2_max"
Dim f
For f = 1 to 22
StatSel(f) = "No"
Next
StatSel(5) = "Yes" 'Maximum
Call StatBlockCalc(",Channel", "1-","[2]/Czas całkowity pracy silnika")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "Czas całkowity pracy silnika
max"
Dim k
For k = 1 to 22
StatSel(k) = "No"
Next
StatSel(4) = "Yes" 'Minimum
StatSel(5) = "Yes" 'Maximum
Call StatBlockCalc("Channel", "1-","[2]/Przebieg")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Minimum").Name = "Przebieg_min"
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Przebieg_min"),Data.Root.
ChannelGroups(2).Channels,5)
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "Przebieg_max"
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Przebieg_max"),Data.Root.
ChannelGroups(2).Channels,6)
Call StatBlockCalc("Channel", "1-","[2]/Total_zu_ON")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Minimum").Name = "Total_zu_min"
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Total_zu_min"),Data.Root.
ChannelGroups(2).Channels,7)
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "Total_zu_max"
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Total_zu_max"),Data.Root.
ChannelGroups(2).Channels,8)
Dim x
For x = 1 to 22
StatSel(x) = "No"

```

```

Next
StatSel(5) = "Yes" 'Maximum
Call StatBlockCalc("Channel", "1-", "[2]/E_AK+")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "E_AK+ max"
Call StatBlockCalc("Channel", "1-", "[2]/E_AK-")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "E_AK- max"
Call StatBlockCalc("Channel", "1-", "[2]/E_ALT")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "E_ALT max"
Call StatBlockCalc("Channel", "1-", "[2]/E_slonca")
Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "E_slonca max"
'Call StatBlockCalc("Channel", "1-", "[2]/E_PV")
'Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("Maximum").Name = "E_PV max"
Call ChnSub("[2]/Przebieg_max", "[2]/Przebieg_min", "[2]/Przebieg_km")
Call ChnLinScale("[2]/Przebieg_km", "[2]/Przebieg_km", 0.001, 0)
Call ChnSub("[2]/Total_zu_max", "[2]/Total_zu_min", "[2]/Total_zu_dm3")
Data.Root.ChannelGroups(1).Name = "Wyniki pomiarow"
Data.Root.ChannelGroups(2).Name = "Wyniki obliczeń"
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("E_AK+ max"), Data.Root.
    ChannelGroups(2).Channels, 14)
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("E_AK- max"), Data.Root.
    ChannelGroups(2).Channels, 15)
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("E_ALT max"), Data.Root.
    ChannelGroups(2).Channels, 16)
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("E_slonca max"), Data.Root.
    ChannelGroups(2).Channels, 17)

'Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(1).Channels("E_PV max"), Data.Root.
    ChannelGroups(2).Channels, 18)
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(2).Channels("Przebieg"), Data.Root.
    ChannelGroups(2).Channels, 14)
Call Data.Move(Data.Root.ChannelGroups(2).Channels("Total_zu_ON"), Data.Root.
    ChannelGroups(2).Channels, 15)
'Call DataFileSave("wynik"&str(i), "TDMS")
Call DataFileSave("wynik_"&DataSetName, "TDMS")
Next
End If

```


Bibliografia

- [1] Abdelhamid M., Haque I., Pilla S., Filipi Z., Singh R.: *Impacts of adding photovoltaic solar system on-board to internal combustion engine vehicles towards meeting 2025 fuel economy cafe standards*. SAE International Journal of Alternative Powertrains, vol. 5(2), pp. 237–248, 2016.
- [2] Abdelhamid M., Singh R., Qattawi A., Omar M., Haque I.: *Evaluation of On-Board Photovoltaic Modules Options for Electric Vehicles*. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4(6), pp. 1576–1584, 2014.
- [3] Abdelhamid M.: *A comprehensive assessment methodology based on life cycle analysis for on-board photovoltaic solar modules in vehicles*. Rozprawa doktorska, Clemson University, 2014.
- [4] Abusleme A., Dixon J., Soto D.: *Improved performance of a battery powered electric car, using photovoltaic cells*. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, vol. 3, pp. 6, 2003.
- [5] ACEA: *Reducing CO2 Emissions From Heavy-Duty Vehicles*. Position Paper of European Automobile Manufacturers Association (ACEA), 2016.
- [6] ACEA: *Vehicles in use, Europe 2018*. Raport European Automobile Manufacturers Association (ACEA), 2018.
- [7] Adinolfi G., Arsie I., Di Martino R., Giustiniani A., Petrone G., Rizzo G., Sorrentino M.: *A Prototype of Hybrid Solar Vehicle: Simulations and On Board Measurements*. Proceedings of Advanced Vehicle Control Symposium, pp. 917–922, 2008.

- [8] Aji S., Ajiatmo D., Robandi I., Suryoatmojo H.: *MPPT based on fuzzy logic controller (FLC) for photovoltaic (PV) system in solar car*. Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology, vol. 4(2), pp. 127–134, 2013.
- [9] Albatayne A., Assaf N.M., Alterman D., Jaradat M.: *Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles*. Environmental and Climate Technologies, vol. 24(1), pp. 669–680, 2020.
- [10] Almonacid G., Muñoz F.J., de la Casa J., Aguilar J.: *Integration of PV systems on health emergency vehicles. The FIVE project*. Progress in Photovoltaics Research and Applications, vol. 12, pp. 609–621, 2004.
- [11] Alsema E., Fraile D., Frischknecht R., Fthenakis V., Held M., Kim H.C., Pölz W., Raugei M., de Wild-Scholten M.: *Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity*. International Energy Agency, Technical report IEA-PVPS T12-03, 2011.
- [12] Andrzejewski M.: *Wpływ stylu jazdy kierowcy na zużycie paliwa i emisję substancji szkodliwych w spalinach*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2013.
- [13] Annaratone D.: *Steam Generators: Description and Design*. Milano, Springer, 2007.
- [14] Araki K., Karr A.J., Chabuel F., Commault B., Derks R., Ding K., Duigou T., Ekins-Daukes N.J., Gaume J., Hirota T., Kanz O., Komoto K., Newman B.K., Peibst R., Reinders A., Roman Medina E., Sechliariu M., Serra L., Sierra A., Zurfluh D.: *State-of-the-art and expected benefits of PV-powered vehicles*. International Energy Agency – PhotoVoltaic Power Systems, report IEA-PVPS T17-01, 2021.
- [15] Araki K., Ota Y., Saiki H., Tawa H., Nishioka K., Yamaguchi M.: *Super-multi-junction solar cells—device configuration with the potential for more than 50% annual energy conversion efficiency (non-concentration)*. Applied Sciences, vol. 9 (21), 2019.
- [16] Araki K., Tawa H., Saiki H., Ota Y., Nishioka K., Yamaguchi M.: *The outdoor field test and energy yield model of the four-terminal on si tandem PV module*. Applied Sciences, vol. 10 (7), 2020.
- [17] Archer C., Jacobson M.: *Evaluation of global wind power*. Journal of Geophysical Research Atmospheres, vol. 110 (D12), 2005.
- [18] Armstrong S., Hurley W.G.: *A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions*. Applied Thermal Engineering, vol. 30(11–12), pp. 1488–1495, 2010.

- [19] Arsie I., Rizzo G., Sorrentino M.: *A model for the optimal design of a hybrid solar vehicle review of automotive engineering*. Review of Automotive Engineering, Society of Automotive Engineers of Japan, vol. 29 (3), pp. 439–447, 2008.
- [20] Arsie I., Rizzo G., Sorrentino M.: *Effects of engine thermal transients on energy management of series hybrid solar vehicles*. Control Engineering Practice, vol. 18 (11), pp. 1231–1238, 2010.
- [21] Arsie I., Rizzo G., Sorrentino M.: *Optimal design and dynamic simulation of a hybrid solar vehicle*. SAE Technical Paper, 2006-01-2997, 2006.
- [22] Assadian F., Mallon K., Fu B.: *The impact of vehicle-integrated photovoltaics on heavy-duty electric vehicle battery cost and lifespan*. SAE Technical Paper, 2016-01-1289, 2016.
- [23] Awate C., Zadokar J., Patel S., Malaviya A., Arora V.: *Modeling a roof-mounted solar modul automobile – benefits and path forward*. SAE Technical Paper, 2015-26-0053, 2015.
- [24] Baehr D.: *Thermodynamik*. Springer Vieweg, Wiesbaden 2012.
- [25] Bahaj A. S.: *World's first solar powered transport refrigeration system*. Renewable Energy, vol. 15, pp. 572–576, 1998.
- [26] Bahaj A.S., James P.A.B.: *Economics of solar powered refrigeration transport applications*. Proceedings of the 29th IEEE PV Specialists Conference, pp. 1561–1564, 2002.
- [27] Bahaj A.S.: *Photovoltaic power for refrigeration of transported perishable goods*. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000 (Cat. No.00CH37036), pp. 1563–1566, 2000.
- [28] Barnosky A.D., Brown J.H., Daily G.C., Dirzo R., Ehrlich A. H., Ehrlich P.R., Eronen J.T., Fortelius M., Hadly E. A., Leopold E. B., Mooney H.A., Myers J. P., Naylor R.L., Palumbi S., Stenseth N. C., Wake M.H.: *Introducing the scientific consensus on maintaining humanity's life support systems in the 21st century: information for policy makers*. The Anthropocene Review, 1(1), pp. 78–109, 2014.
- [29] Bollmeyer C., Keller J.D., Ohlwein C., Wahl S., Crewell S., Friederichs P., Hense A., Keune J., Kneifel S., Pscheidt I., Redl S., Steinke S.: *Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX system*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 141, pp. 1–15, 2015.
- [30] Bradfield M.: *Improving alternator efficiency measurably reduces fuel costs*. Delco Remy, 2008.

- [31] Brodrick C.-J., Dwyer H.A., Farshchi M., Harris D.B., King F.G.: *Effects of engine speed and accessory load on idling emissions from heavy-duty diesel truck engines*. Journal of the Air & Waste Management Association, vol. 22 (9), pp. 1026–1031, 2002.
- [32] Budzyński K., Narowski P.G., Czechowicz J.: *Przygotowanie zbiorów zagregowanych danych klimatycznych dla potrzeb obliczeń energetycznych budynków*, Ministerstwo Infrastruktury, 2004.
- [33] Buhaug O., Corbett J.J., Endresen O., Eyring V., Faber J., Hanayama S., Lee D.S., Lee D., Lindstad H., Markowska A.Z., Mjelde A., Nelissen D., Nilsen J., Pålsson C., Winebrake J.J., Wu W.-Q., Yoshida K.: *Prevention of air pollution from ships: second IMO GHG study 2009*. International Maritime Organization, 2009.
- [34] Buriak J.: *Ocena warunków nasłonecznienia i projektowanie elektrowni słonecznych z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania oraz baz danych*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 40, s. 29–32, 2014.
- [35] Calbo J., Gonzalez J.-A., Pages D.: *A method for sky-condition classification from ground-based solar radiation measurements*. Journal of Applied Meteorology, vol. 40912, pp. 2193–2199, 2001.
- [36] Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H., Cotrim da Cunha L., Cox P.M., Eliseev A.V., Henson S., Ishii M., Jaccard S., Koven C., Lohila A., Patra P.K., Piao S., Rogelj J., Syampungani S., Zaehle S., Zickfeld K.: *Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 673–816, Cambridge University Press, 2021.
- [37] Cañete C., Carretero J., Sidrach-de-Cardona M.: *Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions*. Energy, vol. 65 (C), pp. 295–302, 2014.
- [38] Center for International Earth Science Information Network – CIESIN – Columbia University, International Food Policy Research Institute – IFPRI, The World Bank, and Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT: *Global Rural-Urban Mapping Project, Version 1 (GRUMPv1): Population Density Grid: 2015: Global*. New York: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2011.
- [39] Chen C., Harries J., Brindley H.E., Ringer M.A.: *Spectral signatures of climate change in the Earth's infrared spectrum between 1970 and 2006*. Environmental Science, Physics, vol. 50, pp. 5, 2007.

- [40] Chigirinskya Y., Schertzer D., Lovejoy S., Lazarev A., Ordanovich A.: *Unified multifractal atmospheric dynamics tested in the tropics: part I, horizontal scaling and self criticality*. Nonlinear Processes in Geophysics, vol. 105 (2/3), pp. 105–114, 1994.
- [41] Chłopek Z.: *Estimation of fuel consumption by city Busses*. Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 1 (13), pp. 237–243, 2006.
- [42] Chukwu U.C., Mahajan S.M.: *V2G parking lot with PV rooftop for capacity enhancement of a distribution system*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5(1), pp. 119–127, 2014.
- [43] Clausius R.: *Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen*. Annalen Physik Chemie, vol. 155, pp. 500–524, 1850.
- [44] Cook J., Nuccitelli D., Green S.A., Richardson M., Winkler B., Painting R., Way R., Jacobs P., Skuce A.: *Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature*. Environmental Research Letters, vol. 8 (2), pp. 1–7, 2013.
- [45] Coraggio G., Rizzo G., Pisanti C., Senatore A.: *Energy management and control of a moving solar roof for a vehicle*. SAE Technical Paper, 2011-24-0072, 2011.
- [46] Cucumo M., De Rosa A., Ferraro V., Kaliakatsos D., Marinelli V.: *Correlations of global and diffuse solar luminous efficacy for all sky conditions and comparisons with experimental data of five localities*. Renewable Energy, vol. 33(9), pp. 2036–2047, 2008.
- [47] Cucumo M., De Rosa A., Ferraro V., Kaliakatsos D., Marinelli V.: *Correlations of direct solar luminous efficiency for all sky, clear sky and intermediate sky conditions and comparisons with experimental data of five localities*. Renewable Energy, vol. 35(10), pp. 2143–2156, 2010.
- [48] Czekalski D., Chochowski A., Obstawski P.: *Parametrization of daily solar irradiance variability*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16(5), pp. 2461–2467, 2012.
- [49] Dacpol: Przetworniki prądowe i napięciowe LEM, www.dacpol.eu (dostęp: 4.11.2024).
- [50] Dash P.K., Gupta N.C.: *Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules*. International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 5(1), pp. 148–151, 2015.
- [51] De Castro D., Pascoal E.: *Comparative study for the use of photovoltaics components to energize the automotive air conditioning*. SAE Technical Paper 2014-36-0412, 2014.

- [52] Dearborn M., Ford Motor Company: *Let the sun in: Ford C-Max solar energi concept goes off the grid, gives glimpse of clean vehicle future*, <https://media.ford.com> (dostęp: 4.11.2024).
- [53] DeFelice T.P., Wylie B.K.: *Sky type discrimination using a ground-based sun photometer*. Atmospheric Research, vol. 59–60, pp. 313–329, 2001.
- [54] Demircioğlu O., Es F., Hande Çiftçinar E., Zeybek A., Tuncer C. Turan R.: *Optimisation and design of PV modules for the application on bus roof-top and system integration for solar cooling*. Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics, vol. 13(4), pp. 159–162, 2016.
- [55] Dessler A.: *Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008*. Geophysical Research Letters, vol. 35 (20), pp. 4, 2008.
- [56] Dey P., Paul J., Bylsma J., Karaiskaj D., Luther J.M., Beard M.C., Romero A.H.: *Origin of the temperature dependence of the band gap of PbS and PbSe quantum dots*. Solid State Communication, vol. 165, pp. 49–54, 2013.
- [57] Donno M., Ferrari A., Scarpelli A., Perlo P., Bocca A.: *Mechatronic system for energy efficiency in bus transport*. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), pp. 342–343, 2012.
- [58] Dreszer K.A., Michałek R., Roszkowski A.: *Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie*. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Warszawa, 2003.
- [59] Duchon C.E., O'Malley M.S.: *Estimating cloud type from pyranometer observations*. Journal of Applied Meteorology, vol. 38(1), pp. 132–141, 1999.
- [60] Dupont J.C., Haeffelin M., Long C.N.: *Evaluation of cloudless-sky periods detected by shortwave and longwave algorithms using lidar measurements*. Geophysical Research Letters, vol. 35, 2008.
- [61] Edwards L.: *Introducing the i-Cool Solar air conditioning for trucks*: <https://phys.org/news/2010-10-i-cool-solar-air-conditioning-trucks.html> (dostęp: 4.11.2024).
- [62] Egiziano L., Giustiniani A., Lisi G., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M.: *Experimental characterization of the photovoltaic generator for a hybrid solar vehicle*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 329–334, 2007.
- [63] Electric Truck with Fully Integrated Photovoltaics Picks Up Speed, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/electric-truck-with-fully-integrated-photovoltaics-picks-up-speed.html> (dostęp: 4.11.2024).

- [64] Elnozahy M.S., Salama M.M.A.: *Studying the feasibility of charging plug-in hybrid electric vehicles using photovoltaic electricity in residential distribution systems*. Electric Power Systems Research, vol. 110, pp. 133–143, 2014.
- [65] Emery K., Burdick J., Caiyem Y., Dunlavy D., Field H., Kroposki B., Moriarty T., Ottoson L., Rummel S., Strand T., Wanlass M.W.: *Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems*. Proceedings of the 1996 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1275–1278, Washington, USA, 1996.
- [66] Emery K.: *Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules*, [in:] *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, red. Luque A., Hegedus S., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 797–840, 2011.
- [67] Erkkilä K., Hartikka P.L., Laine P., Ahtiainen M., Rahkola P., Nylund N., Mäkelä K., Lappi M.: *Energy-efficient and intelligent heavy-duty vehicle (HDENIQ)*. Annual report VTT-R-02704-11, 2011.
- [68] Esterly S.: *2013 Renewable Energy Data Book (Book)*. Raport nr DOE/GO-102014-4491, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Unitet States, 2014.
- [69] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport: *EU Transport in figures*, <http://data.europa.eu> (dostęp: 4.11.2024).
- [70] European Commission: Directorate-General for Climate Action, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Mobility and Transport, Zampara M., Obersteiner M. et al.: *EU reference scenario 2016 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050*. Publications Office, 2016.
- [71] European Commission: Directorate-General for Energy: *EU energy in figures – Statistical pocketbook 2022*, Publications Office of the European Union, 2022.
- [72] European Commission: Directorate-General for Energy: *EU energy in figures – Statistical pocketbook 2016*. Publications Office of the European Union, 2016.
- [73] Fabbri G., Carta A., Boccaletti C., Cardoso, A.J.M., Mascioli, F.M.F.: *Simulation and design of a photovoltaic roof for automotive applications*. IEEE International Symposium on Communication, pp. 1726–1731, 2012.
- [74] Fice M., Setlak R.: *Analiza energetyczna rzeczywistych cykli jazdy*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 90, s. 99–103, 2011.

- [75] Fournier E., Bayne T.: *Under hood temperature measurements*. SAE Technical Paper 2007-01-1393, 2007.
- [76] Fraunhofer ISE: *Photovoltaics Report*, 2021.
- [77] Friedlingstein P. et al.: *Global Carbon Budget 2019*. Earth System Science Data, vol. 11(4), pp. 1783–1838, 2019.
- [78] Friedlingstein P. et al.: *Global Carbon Budget 2020*. Earth System Science Data, vol. 12(4), pp. 3269–3340, 2020.
- [79] Friesen G., Pavanello D., Virtuani A.: *Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies*. Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2010.
- [80] Frisch U.: *Turbulence: The legacy of AN Kolmogorov*, Cambridge University Press, 1995.
- [81] Fthenakis V., Frischknecht R., Raugei M., Kim H.C., Alsema E., Held M., de Wild-Scholten M.: *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*. Raport IEA-PVPS T12-03:2011, International Energy Agency Photovoltaic Power systems Programme, 2011.
- [82] Gaines L., Vyas A., Anderson L.: *Estimation of fuel use by idling commercial trucks*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1983 (1), pp. 91–98, 2006.
- [83] Gao Y., Chen L., Ehsani M.: *Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV*. SAE Technical Paper 1999-01-2910, 1999.
- [84] Gao Z., LaClair T., Daw C., Smith D.: *Simulations of the fuel economy and emissions of hybrid transit buses over planned local routes*. SAE International Journal of Commercial Vehicles, vol. 7(1), pp. 216–237, 2014.
- [85] Gao Z., Lin Z., Franzese O.: *Energy consumption and cost savings of truck electrification for heavy-duty vehicle applications*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2628(1), pp. 99–109, 2017.
- [86] Gastón R., Leon T., Mallor F., Ramírez-Santigosa L.: *A morphological clustering method for daily solar radiation curves*. Solar Energy, vol. 85 (9), pp. 1824–1836, 2011.
- [87] Gates Corporation: *Selecting the right drive system – costs and performance*. Reliable Plant, Denver, 2006.
- [88] Gebisa A., Gebresenbet G., Gopal R., Nallamotheu R.B.: *Driving cycles for estimating vehicle emission levels and energy consumption*. Future Transportation, vol. 1(3), pp. 615–638, 2021.

- [89] Gęca M., Wendeker M., Grabowski Ł.: *A city bus electrification supported by the photovoltaic power modules*, SAE Technical Paper, 2014-01-2898, 2014.
- [90] Ghonima M.S., Urquhart B., Chow C.W., Shields J.E., Cazorla A., Kleissl J.: *A method for cloud detection and opacity classification based on ground based sky imagery*. Atmospheric Measurement Techniques, vol. 5(11), pp. 2881–2892, 2012.
- [91] Giannouli M., Yianoulis P.: *Study on the incorporation of photovoltaic systems as an auxiliary power source for hybrid and electric vehicles*. Solar Energy, vol. 86 (1), pp. 441–451, 2012.
- [92] Gis M.: *Analiza porównawcza emisji spalin autobusów miejskich z silnikami zasilanymi olejem napędowym oraz paliwami alternatywnymi*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2018.
- [93] Globenergia: *Organiczne ogniwa słoneczne*. <https://globenergia.pl/organiczne-ogniwa-sloneczne-3/> (dostęp: 4.11.2024).
- [94] Główny Urząd Statystyczny: *Transport – Wyniki działalności w 2021 roku*. Rocznik GUS, Warszawa, 2022.
- [95] Gong Q., Midlam-Mohler S., Marano V., Rizzoni G.: *Study of PEV charging on residential distribution transformer life*. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3 (1), pp. 404–412, 2012.
- [96] Grabowski Ł., Pietrykowski K., Gęca M., Barański G.: *The Electric Power Generation Efficiency in City Bus*. SAE Technical Papers, 2014-01-2899, 2014.
- [97] Grabowski Ł., Wendeker M., Barański G., Duk M.: *Study of the efficiency of on-board electricity generation in the city bus*. Combustion Engines, vol. 171 (4), pp. 29–32, 2017.
- [98] Gracia Amillo A., Huld T., Müller R.: *A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation*. Remote Sensors, vol. 6 (9), pp. 8165–8189, 2014.
- [99] Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Bothe K., Hinken D., Rauer M., Hao X.: *Solar cell efficiency tables (Version 60)*. Progress in Photovoltaics Res Appl., 30, pp. 687–701, 2022.
- [100] Green M.A.: *Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost*. Progress in Photovoltaics Research and Applications, vol. 9(2), pp. 123–135, 2001.
- [101] Hamilton C., Gamboa G., Elmes J., Kerley R., Arias A., Pepper M., Batarseh I.: *System architecture of a modular direct-DC PV charging station for plug-in electric vehicles*. 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2516–2520, 2010.

- [102] Harries J., Brindley H., Sagoo P., Bantges R.J.: *Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997*. Nature, vol. 410 (6826), pp. 355–357, 2001.
- [103] Harrison R.G., Chalmers N., Hogan R.J.: *Retrospective cloud determinations from surface solar radiation measurements*. Atmospheric Research, vol. 90(1), pp. 54–62, 2008.
- [104] Helwa N.H., Bahgat A.B.G., El Shafee A.M.R., ElShenawy E.T.: *Maximum collectable solar energy by different solar tracking systems*. Energy Sources, vol. 22(1), pp. 23–34, 2000.
- [105] Hogan R.J., Jakov C., Illingworth A.J.: *Comparison of ECMWF winter-season cloud fraction with radar-derived values*. Journal of Applied Meteorology, vol. 40(3), pp. 513–525, 2001.
- [106] Holmberg K., Andersson P., Nylund N., Mäkelä K., Erdemir A.: *Global energy consumption due to friction in trucks and buses*. Tribology International, vol. 78, pp. 94–114, 2014.
- [107] Houghton J.T., Meira Filho L.G., Lim B., Treanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J., Callender B.A.: *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Raport The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Bracknell, 1996.
- [108] <http://www.volkswagen.pl> (dostęp: 4.11.2024).
- [109] Huang N.E., Shen Z., Long S.R.: *A new view of nonlinear water waves: the hilbert spectrum* Annu. Rev. Fluid Mech., 31 (1), pp. 417–445, 1999.
- [110] Huld T., Müller R., Gambardella A.: *A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa*. Solar Energy, vol. 86, pp. 1803–1815, 2012.
- [111] Huo H., He K., Wang M., Yao Z.: *Vehicle technology, fuel-economy policies, and fuel-consumption rates of Chinese vehicles*. Energy Policy, vol. 43, pp. 30–36, 2012.
- [112] Interaktywny System Geograficznej Informacji Fotowoltaicznej, <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (dostęp: 4.11.2024).
- [113] International Association of Public Transport: *SORT – Standardised On-Road Tests Cycles*. Brussels–Belgium, 2003.
- [114] International Energy Agency: *International energy agency in world energy outlook*, <https://www.iea.org/weo> (dostęp: 4.11.2024).
- [115] International Energy Agency: *Key World Energy Statistics 2019*.
- [116] International Standard IEC 60904-6;1994: *Photovoltaic devices – część 6: Requirements for reference solar modules*.

- [117] Jak szybujący orzeł. Konceptyjne Iveco Glider <https://www.truck.pl/pl/article/944/jak-szybuj%C4%85cy-orze%C5%82-konceptyjne-iveco-glider,943> (dostęp: 4.11.2024).
- [118] Kádár P., Varga A.: *PhotoVoltaic EV charge station*. IEEE 11th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), pp. 57–60, 2013.
- [119] Kang B.O., Tam K.S.: *A new characterization and classification method for daily sky conditions based on ground-based solar irradiance measurement data*. Solar Energy, vol. 94, pp. 102–118, 2013.
- [120] Kies A.: *A contribution to the analysis of fuel efficiency measures for heavy-duty vehicles*. Rozprawa doktorska, Technische Universität Graz, Graz 2017.
- [121] Kłosowski M.: *Dwuwymiarowa dozymetria termoluminescencyjna*. Rozprawa habilitacyjna, Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2019.
- [122] Kratochvil J.A., Boyson W.E., King D.L.: *Photovoltaic array performance model*. U.S. Department of Energy, report SAND 2004–3535N, 2004.
- [123] Lam J.C., Li D.H.W.: *Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components*. Building and Environment, vol. 31(6), pp. 527–535, 1996.
- [124] Lamb W.F., Grubb M., Diluiso F., Minx J.C.: *Countries with sustained greenhouse gas emissions reductions: an analysis of trends and progress by sector*. Climate Policy, vol. 22(1), pp. 1–17, 2021.
- [125] Landsberg P.T., Badescu V.: *Carnot factor in solar cell efficiencies*. Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 33(22), pp. 3004–3008, 2000.
- [126] Le Quere C., Andrew R.M., Friedlingstein P. et al.: *Global carbon budget 2018*. Earth System Science Data, vol. 10(4), pp. 2141–2194, 2018.
- [127] Lee T., Filipi Z.: *Impact of model-based lithium-ion battery control strategy on battery sizing and fuel economy in heavy-duty HEVs*. SAE International Journal Commercial Vehicles, vol. 4(1), pp. 198–209, 2011.
- [128] Letendre S., Perez R., Herig C.: *Vehicle integrated PV: a clean and secure fuel for hybrid electric vehicles*. Proceedings of the American Solar Energy Society, Solar 2003 Conference, 2003.
- [129] Letendre S., Perez R., Herig, C.: *Battery-powered, electric-drive vehicles providing buffer storage for PV capacity value*. Proceedings of the solar conference, American Solar Energy Society; American Institute of Architects, pp. 105–110, 2002.

- [130] Li D.H.W., Lam J.C.: *An analysis of climatic parameters and sky condition classification*. Building and Environment, vol. 36(4), pp. 435–445, 2001.
- [131] Li D.H.W., Tang H.L.: *Standard skies classification in Hong Kong*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 70 (8–9), pp. 1222–1230, 2008.
- [132] Long C.N., Ackerman T.P.: *Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects*. Journal of Geophysical Research Atmospheres, vol. 105 (D12), pp. 15609–15626, 2000.
- [133] Lovejoy S., Schertzer D., Stanway J.D.: *Direct evidence of multifractal atmospheric cascades from planetary scales down to 1 km*. Phys. Rev. Lett., vol. 86(22), pp. 5200–5203, 2001.
- [134] Ma T., Mohammed O.A.: *Optimal charging of plug-in electric vehicles for a car-park infrastructure*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50(4), pp. 2323–2330, 2014.
- [135] Maafi A., Harrouni S.: *Preliminary results of the fractal classification of daily solar irradiances*. Solar Energy, 77(1), pp. 53–61, 2003.
- [136] Mallon K.R., Assadian F., Fu B.: *Analysis of on-board photovoltaics for a battery electric bus and their impact on battery lifespan*. Energies, vol. 10(7), 2017.
- [137] Marano V., Medina H., Sorrentino M., Rizzo G.: *A model to assess the benefits of an after-market hybridization kit based on realistic driving habits and charging infrastructure*. SAE International Journal of Alternative Powertrains, vol. 2(3), pp. 471–481, 2013.
- [138] Markou M.T., Bartzokas A., Kambezidis H.D.: *A new statistical methodology for classification of sky luminance distributions based on scan data*. Atmospheric Research vol. 86 (3–4), pp. 261–277, 2007.
- [139] Marty C., Philipona R.: *The Clear-Sky Index to separate clear-sky from cloudy sky situations in climate research*. Geophysical Research Letters, vol. 27 (17), pp. 2649–2652, 2000.
- [140] Merkisz J., Bajerlein M., Daszkiewicz P.: *The influence of the application of photovoltaic cells in city buses to reduce fuel consumption – (CO₂) and exhaust emissions (HC, PM, and NO_x)*. International Conference on Power and Energy Systems, Lecture Notes in Information Technology, vol. 13, pp. 106–113, 2012.

- [141] Minx J.C., Lamb W.F., Andrew R.M., et al.: *A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019*. Earth System Science Data, vol. 13(11), pp. 5213–5252, 2021.
- [142] Morales A., Wächter M., Peinke J.: *Characterization of wind turbulence by higher-order statistics*. Wind Energy, vol. 15(5), pp. 391–406, 2011.
- [143] Mouli G.C., Bauer P., Zeman M.: *System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces*. Applied Energy, vol. 168, pp. 434–443, 2016.
- [144] Mukut A.N.M.M.I., Abedin M.Z.: *Review on aerodynamic drag reduction of vehicles*. International Journal of Engineering Materials and Manufacture, vol. 4(1), pp. 1–14, 2019.
- [145] Muller M., Marion B., Rodriguez J.: *Evaluating the IEC 61215 Ed.3 NMOT procedure against the existing NOCT procedure with PV modules in a side-by-side configuration*. U.S. Department of Energy, raport NREL/CP-5200-54135, 2012.
- [146] Muller M.: *Measuring and modeling nominal operating cell temperature (NOCT)*. Proceedings of PV Performance Modeling Workshop, 2010.
- [147] Müller R., Behrendt T., Hammer A., Kemper A.: *A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands*. Remote Sensing, vol. 4(3), pp. 622–647, 2012.
- [148] Müller R., Matsoukas C., Gratzki A., Ber H., Hollmann R.: *The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance—A LUT based eigenvector hybrid approach*. Remote Sensing in Environment, vol. 113(5), pp. 1012–1024, 2009.
- [149] Muneer T., Gul M.S., Kubie J.: *Models for estimating solar radiation and illuminance from meteorological parameters*. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 122(3), pp. 146–153, 2000.
- [150] Myczko A., Karłowski J., Lenarczyk J.: *Porównanie efektywności energetycznej zestawu modułów fotowoltaicznych stacjonarnych i pracujących w układzie nadążnym w warunkach gospodarstwa rolnego*. Problemy Inżynierii Rolniczej, nr 4, s. 91–99, 2010.
- [151] NASA: *Scientific consensus*. <https://science.nasa.gov/climate-change/scientific-consensus> (dostęp: 4.11.2024).
- [152] National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO: *Best Research-Cell Efficiency Chart*, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (dostęp: 4.11.2024).

- [153] National Renewable Energy Laboratory: *PVWatts Calculator*. www.nrel.gov/rredc/pvwatts
- [154] Norris J., Hill N., Kirsch F., Nurse D., Revereault P., Preston M.: *Quantifying energy consumption of HDV auxiliary components and their contribution to CO₂ emissions of buses and coaches*. Heavy Duty Vehicles Framework Contract – Service Request 3 Final Report for DG Climate Action, CLIMA.C.2/FRA/2013/0007, 2013.
- [155] Nuclear Energy Agency: *Uranium 2018 resources, production and demand*. A Joint and the International Atomic Energy Agency, OECD Publishing, Paris, 2018.
- [156] Nussey B.: *The earth gets more solar energy in one hour than the entire world uses in a year*, www.freeingenergy.com (dostęp: 4.11.2024).
- [157] O’Gorman T., Stephens D., Bohn T., Carlson R.: *Automotive alternator synchronous rectification via self-sensing method for improved vehicle fuel consumption*. Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), pp. 1726–1730, 2007.
- [158] Oprešnik R.S., Seljak T., Vihar R., Gerbec M., Kutrašnik T.: *Real-world fuel consumption, fuel cost and exhaust emissions of different bus powertrain technologies*. *Energies*, vol. 11(8), 2018.
- [159] Orsini A., Tomasi C., Calzolari F., Nardino M., Cacciari A., Georgiadis T.: *Cloud cover classification through simultaneous ground-based measurements of solar and infrared radiation*. *Atmospheric Research*, vol. 61, pp. 251–275, 2022.
- [160] Pachauri R.K., Meyer L.A.: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2014.
- [161] Pachernegg S.: *A Closer Look at the Willans-Line*. *SAE Technical Paper 690182*, 1969.
- [162] Pages D., Calbo J., Gonzalez J.A.: *Using routine meteorological data to derive sky conditions*. *Annales Geophysicae*, vol. 21, pp. 649–654, 2003.
- [163] Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R.: *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*. *Solar Energy* 44(1), pp. 271–289, 1990.
- [164] Perez R., Ineichen P., Seals R., Zelenka A.: *Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions*. *Solar Energy*, vol. 45(2), pp. 111–114, 1990.

- [165] Perez, R., Perez M.: *Update 2022 – A fundamental look at energy reserves for the planet*. Solar Energy Advances, vol. 2(D12), 2022.
- [166] Pettersson N., Johansson K.H.: *Modelling and control of auxiliary loads in heavy vehicles*. International Journal of Control, vol. 79(5), pp. 479–495, 2006.
- [167] Photovoltaic Price Index, <https://www.pvxchange.com/Price-Index> (dostęp: 4.11.2024).
- [168] Plastow J.: *Progress in building integrated PV technologies*. Record of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, vol. 2, pp. 2316–2318, 2007.
- [169] Podegrodzki J.: *Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961–1995*. Materiały Badawcze IMiGW, Warszawa, 2000.
- [170] Poudenx P., Merida W.: *Energy demand and greenhouse gas emissions from urban passenger transportation versus availability of renewable energy: The example of the Canadian Lower Fraser Valley*. Energy, vol. 32(1), pp. 1–9, 2007.
- [171] Powell J.: *Climate scientists virtually unanimous: anthropogenic global warming is true*. Bulletin of Science, Technology & Society, vol. 35(5–6), pp. 121–124, 2016.
- [172] Projekt nr PBS2/A6/16/2013: *Opracowanie technologii autobusowych struktur fotowoltaicznych zmniejszających zużycie paliwa i emisję toksycznych składników spalin*, Raport PBS/1/2014, Lublin, 2014.
- [173] Projekt nr PBS2/A6/16/2013: *Opracowanie technologii autobusowych struktur fotowoltaicznych zmniejszających zużycie paliwa i emisję toksycznych składników spalin*, Raport R/PVBUS/2, Lublin, 2014.
- [174] Quaschnig V.: *The sun as an energy resource: Technology fundamental*. Renewable Energy World, vol. 6(5), pp. 90–93, 2003.
- [175] Rahim R., Baharuddin H., Mulyadi R.: *Classification of daylight and radiation data into three sky conditions by cloud ratio and sunshine duration*. Energy Buildings, vol. 36(7), pp. 660–666, 2004.
- [176] Rahman S., Masjuki H.H., Hasanuzzaman Md.: *Performance of an improved solar car ventilator*. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, vol. 4(1), pp. 24–34, 2009.
- [177] RENI: *Inverter, Storage and PV System Technology, Industry Guide – 2013*. Berlin, Germany, Solarpraxis AG, 2013.

- [178] Rizzo G., Marano, V., Pisanti, C., et al.: *A prototype mild-solar-hybridization kit: design and challenges*. Energy Procedia, vol. 45 (2014), pp. 1017–1026, 2014.
- [179] Rizzo G., Sorrentino M., Arsie I.: *Rule-based optimization of intermittent ice scheduling on a hybrid solar vehicle*. SAE International Journal of Engines, vol. 2(2), pp. 521–529, 2010.
- [180] Rizzo G.: *Automotive Applications of Solar Energy*, IFAC Proceedings, vol. 43(7), pp. 174–185, 2020.
- [181] Robert Bosch GmbH, Reif K., Dietsche K.: *Automotive handbook*. Villey, Karlsruhe 2014.
- [182] Ross J.R.G., Smokler M.I.: *Flat-Plate Solar Array Project Final Report*, pp. 86–31, 1986.
- [183] Ross R.G.: *Flat-plate photovoltaic array design optimization*. Proceedings of 14th IEEE Photovoltaic Specialistics Conference, pp. 1126–1132, 1980.
- [184] Sachs D., Lovejoy S., Schertzer D.: *The multifractal scaling of cloud radiances from 1 m to 1 km*. Fractals 10(03), pp. 253–265, 2002.
- [185] Saga T.: *Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production*. NPG Asia Mater, vol. 2, pp. 96–102, 2010.
- [186] Sasaki K., Yokota M., Nagayosh H., Kamisako K.: *Evaluation of electric motor and gasoline engine hybrid car using solar cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 47(1–4), pp. 259–263, 1997.
- [187] Schertzer D., Lovejoy S., Schmitt F., Chigirinskaya Y., Marsan D.: *Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency*. Fractals, 5(3), pp. 427–471, 1997.
- [188] Schertzer D., Lovejoy S.: *Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes*. Journal of Geophysical Research Atmospheres, vol. 92 (D8), pp. 9693–9714, 1987.
- [189] Schuckert M., Krukenberg R.: *CO₂/FE regulatory developments around the world. Results from vehicle simulation study*. EC/ICCT Workshop on CO₂ emissions from Heavy Duty Vehicles, 2011.
- [190] Simburger E.J., Simburger J.T., Bagnall M.: *PV Prius; 8: Terrestrial PV Systems 8.1 Stand Alone Systems, Including Hybrid Systems*. Record of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, vol. 2, pp. 2404–2406, 2007.
- [191] Singh R., Alapatt G.F., Lakhtakia A.: *Making solar cells a reality in every home: opportunities and challenges for photovoltaic device design*. EEE Journal of the Electron Devices Society, vol. 1(6), pp. 129, 144, 2013.

- [192] Singh R.: *Why silicon is and will remain the dominant photovoltaic material*, Journal of Nanophotonics, vol. 3(1), 2009.
- [193] Sioshansi R., Fagiani R., Marano V.: *Cost and emissions impacts of plug-in hybrid vehicles on the Ohio power system*. Energy Policy, vol. 38(11), pp. 6703–6712, 2010.
- [194] Soubdhan T., Emilion R., Calif R.: *Classification of daily solar radiation distributions using mixture of Dirichlet distributions*. Solar Energy, vol. 83(7), pp. 1056–1063, 2009.
- [195] Soylu S.: *Examination of PN emissions and size distributions of a hybrid city bus under real world urban driving conditions*. International Journal of Automotive Technology, vol. 15(3), pp. 369–76, 2014.
- [196] Soylu S.: *The effects of urban driving conditions on the operating characteristics of conventional and hybrid electric city buses*. Applied Energy, vol. 135(15), pp. 472–482, 2014.
- [197] Spina M.A., de la Vega R.J., Rossi S.R., et al.: *Some issues on the design of a solar vehicle based on hybrid energy system*. International Journal of Energy Engineering, vol. 2(1), pp. 15–21, 2012.
- [198] Stanton D.: *Systematic development of highly efficient and clean engines to meet future commercial vehicle greenhouse gas regulations*. SAE International Journal of Engines, vol. 6(3), pp. 1395–1480, 2013.
- [199] Statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków, <https://dane.gov.pl/> (dostęp: 4.11.2024).
- [200] Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2014.
- [201] Strauss D., Fehr R., Cain A.: *Vehicle surfaces: a parking lot PV solar energy power generation system*. SAE Technical Paper 2009-01-2870, 2009.
- [202] Surampudi B., Redfield J., Ostrowski G.: *Mild regenerative braking to enhance fuel economy via lowered engine load due to alternator*. SAE Technical Paper, 2008-01-2560, 2008.
- [203] Suri M.: *Global Irradiation GIS Database for Central and Eastern Europe*. PVNET Workshop Proceedings RTD Strategy for PV, JRC 2002.
- [204] Szczepaniak M., Wojciechowski A., Chmielowiec J.: *Hybrid power system using hydrogen and renewable energy sources*. Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej, Instytut Elektrotechniki, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 1 (101), 2014.

- [205] Szlachetka M., Barański G., Grabowski Ł., Majczak A.: *Badania sprawności autobusowego silnika spalinowego w warunkach ruchu miejskiego*. Logistyka, nr 3, s. 6123–6131, 2014.
- [206] Szymański B.: *Diody bocznikujące i ich wpływ na wydajność paneli PV*, <http://solaris18.blogspot.com/2012/10/diody-bocznikujace-i-ich-wplyw-na.html> (dostęp: 4.11.2024).
- [207] Tawa H., Saiki H., Ota Y., Araki K., Takamoto T., Nishioka K.: *Accurate output forecasting method for various photovoltaic modules considering incident angle and spectral change owing to atmospheric parameters and cloud conditions*. Applied Sciences, vol. 10(2), 2020.
- [208] Technology & Maintenance Council: *Exploring the Potential for 48-Volt Commercial Vehicle Electrical Systems*, <https://tmc.trucking.org> (dostęp: 4.11.2024).
- [209] Thomas V.M., Meier A.K., Gunda S.G., Wenzel T.P.: *Cars are buildings: Building-like energy use in automobiles*. Transportation Research Part D, vol. 16(4), pp. 341–345, 2011.
- [210] Tobler W., Deichmann U., Gottsegen J., Maloy K.: *The global demography project*. Raport nr TR-95-6, UC Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis, 1995, <https://escholarship.org/uc/item/0kt69058#author> (dostęp: 4.11.2024).
- [211] *Uganda's Kiira Motors unveils 'Africa's first solar bus'*, <https://www.bbc.com/news/world-africa-35458465> (dostęp: 4.11.2024).
- [212] Urabe S., Kimura K., Kudo Y., Sato A.: *Effectiveness and issues of automotive electric power generating system sing solar modules*. SAE Technical Paper, 2016-01-1266, 2016.
- [213] US Environmental Protection: *Fast facts: us transportation sector greenhouse gas emissions 1990–2022*. EPA-420-F-24-022, <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions> (dostęp 4.11.2024).
- [214] Van Zyl P.S., Heijne V.A.M., Ligterink N.E.: *Using a simplified Willans line approach as a means to evaluate the savings potential of CO₂ reduction measures in heavy-duty transport*. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, vol. 7(1), pp. 99–117, 2017.
- [215] Vehicle Energy Consumption Calculation Tool – VECTO, <https://climate.ec.europa.eu> (dostęp 4.11.2024).
- [216] *Verkehr in Zahlen 2016/2017*. Raport, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hamburg 2016.

- [217] *Verkehrswirtschaftliche Zahlen 2015/2016. Raport.* Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung, Frankfurt am Main 2016.
- [218] Vulpiani A., Livi R.: *The kolmogorov legacy in physics.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- [219] Wang C., Tan G., Guo X., Tian Z. et al.: *The energy management for solar powered vehicle parking ventilation system.* SAE Technical Paper, 2016-01-0240, 2016.
- [220] Watson B.P., Lovejoy S., Grosdider Y., Schertzer D.: *Scattering in thick multifractals clouds, part I: overview and single scattering.* Physica A, vol. 388(18), pp. 3695–3710, 2009.
- [221] Weaver J.F.: *Efficiency record isn't the biggest change for Alta Devices' GaAS solar technology,* <https://www.pv-magazine.com/2018/12/17/efficiency-record-isnt-the-biggest-change-for-alta-devices-gaas-solar-technology> (dostęp: 4.11.2024).
- [222] Weekly Oil Bulletin, <https://energy.ec.europa.eu> (dostęp: 4.11.2024).
- [223] Weiss C.C.: *Mercedes-Benz premieres Aerodynamic Truck and Trailer,* <https://newatlas.com/mercedes-benz-aerodynamic-truck-trailer/24262/> (dostęp 4.11.2024).
- [224] Wendeker M., Barański G., Gęca M.: *Analiza ekonomiczna zastosowania technologii autobusowych struktur fotowoltaicznych w warunkach miejskich.* Logistyka, nr 3, s. 6652–6659, 2014.
- [225] Wendeker M., Gęca M., Grabowski Ł., Barański G.: *Measuring regenerative braking electricity generated by the city bus with internal combustion engine.* Advances in Science and Technology Research Journal, vol. 15(3), pp. 215–223, 2021.
- [226] Wendeker M., Gęca M.J., Grabowski Ł., Pietrykowski K., Kasianantham N.: *Measurements and analysis of a solar-assisted city bus with a diesel engine.* Applied Energy, vol. 309, 2022.
- [227] Wheeler A., Leveille M., Anton I., Leilaouioun A., Kurtz S.: *Determining the operating temperature of solar panels on vehicles.* IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 3592–3597, 2019.
- [228] Willans P.: *Steam Engine Trials.* Nature, vol. 47, 1893.
- [229] World Energy Council: *Global transport scenarios 2050.* WEC, London, 2011.
- [230] World Meteorological Organization: *WMO Statement on the state of the global climate in 2016.* Raport WMO-no. 1189, 2017.
- [231] World Nuclear Association: *Supply of Uranium.* <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium> (dostęp: 4.11.2024).

- [232] www.hukseflux.com (dostęp: 4.11.2024).
- [233] Younes S., Muneer T.: *Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data-base*. Applied Energy, vol. 84(6), pp. 623–645, 2007.
- [234] Yuan Y., Wang J., Yan X., et al.: *A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship*. Energy, vol. 165, Part A, pp. 965–978, 2018.
- [235] Zeitzén F.: *Immer abwärts*. Lastauto Omnibus, 4, 2014.
- [236] Zhang J., Lv C., Kong D.: *Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car*. Proceedings of Institute of Mechanical Engineering, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 226(10), pp. 1289–1302, 2012.
- [237] Zhang S., Wu Y., Liu H., Huang R., Yang L., Li Z., Fu L., Hao J.: *Real-world fuel consumption and CO₂ emissions of urban public buses in Beijing*. Applied Energy, vol. 113(C), pp. 1645–1655, 2014.
- [238] Zhang X., Monokroussos C., Schweiger M., Heinze M.: *Power rating and qualification of bifacial PV modules*. Photovoltaics International, vol. 40, 2018.
- [239] Zhihua L., Ge Y., Johnson K.C., et al.: *Real-world operation conditions and on-road emissions of Beijing diesel buses measured by using portable emission measurement system and electric low-pressure impactor*. The Science of The Total Environment, vol. 409(8), pp. 1476–1480, 2011.