



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.6>

Analiza efektywności energetycznej i założenia techniczne rozbudowy instalacji fotowoltaicznych na dachach obiektów przemysłowych

Mariusz Woszczyński – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Stankiewicz – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono sposób postępowania przy projektowaniu instalacji fotowoltaicznych, począwszy od prac przygotowawczych, poprzez dobór podzespołów, wizualizację instalacji oraz symulację spodziewanych uzysków. Zaprezentowano najważniejsze zasady, które należy uwzględnić przy planowaniu instalacji PV. Omówiono sposoby doboru urządzeń, przewodów oraz zabezpieczeń, a także zasygnalizowano problem obciążenia konstrukcji dachowych. Zaprezentowano ciekawe wyniki symulacji rozbudowy instalacji fotowoltaicznych na przykładzie budynków ITG KOMAG. Spodziewany okres zwrotu inwestycji, szacowany jest na maksymalnie 10 lat. Biorąc pod uwagę cykl życia paneli fotowoltaicznych, wynoszący 25 lat, inwestycja w fotowoltaikę jest jednym z najbardziej korzystnych sposobów zagospodarowania dachów lub powierzchni nieużytków.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, efektywność energetyczna, projektowanie

Energy efficiency analysis and technical assumptions for the development of photovoltaic installations on the roofs of industrial buildings

Abstract: The paper presents a procedure for the design of photovoltaic installations, starting from preliminary work, through component selection, visualisation of the installation and simulation of the expected profits. The most important principles to be considered when planning a PV installation are presented. It discusses the selection of equipment, conductors and protections as well as the problem of roof structure loads. Interesting results of the simulation of the construction of photovoltaic installations on the example of ITG KOMAG buildings were presented. The expected period of return on investment is estimated for up to 10 years. Taking into account the life cycle of photovoltaic panels, which is 25 years, investment in photovoltaics is one of the most beneficial ways to develop roofs or wasteland areas.

Keywords: photovoltaics, energy efficiency, design

1. Wprowadzenie

Działania na rzecz zwiększenia efektywności energetycznej w przedsiębiorstwie mogą przynieść wymierne korzyści zarówno w kontekście oszczędności energii, jak i ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko. To jeden z najlepszych sposobów na sprostanie wyzwaniom, przed którymi stoi Polska, a które wynikają z coraz bardziej ograniczonych zasobów energetycznych oraz rosnącego uzależnienia od importu energii z zagranicy. Zwiększenie udziału energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii przyczynia się również do zwiększenia świadomości społecznej dotyczącej efektywności energetycznej. Prezentowane w literaturze [1, 2] dyskusje poruszają problemy wybranych zagadnień związanych z efektywnością energetyczną budynków (również w zakresie bezpieczeństwa dostaw energii i bezpieczeństwa środowiskowego) oraz działaniach na rzecz jej poprawy. Kluczowy wpływ na poprawę efektywności energetycznej budynków mają instalacje energetyczne, wykorzystujące odnawialne źródła energii. Przewiduje się, że najszybciej będą rozwijać się technologie wykorzystujące energię wiatru oraz energię ze słońca.



Fotowoltaika (PV) jest to dziedzina nauki i techniki zajmująca się bezpośrednim przetwarzaniem promieniowania słonecznego na energię elektryczną, przy wykorzystaniu zjawiska fotowoltaicznego. Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi, jest największym potencjalnym źródłem energii dostępnym dla człowieka.

Panele fotowoltaiczne dzielą się na 3 podstawowe generacje [3, 4]. Panele I generacji, obecnie dominujące na rynku, zbudowane są z ogniw, wytwarzanych z mono i polikrystalicznego krzemu. Sprawność ogniw pierwszej generacji obecnie wynosi około 20-24%, a maksymalna sprawność szacowana jest na 29%. Do 2018 r. największy udział w rynku miały moduły polikrystaliczne, jednak w ostatnim czasie sytuacja zmieniła się na korzyść modułów monokrystalicznych, które obecnie dominują na rynku (98% udziału w nowych instalacjach PV) [5].

Panele II generacji są nazywane ogniwami cienkowarstwowymi, ze względu na to, że materiał półprzewodnikowy (głównie tellurek kadmu (CdTe - 10÷12% sprawności) lub mieszanina miedzi, indu, galu i selenu (CIGS - 12÷14% sprawności) nanoszony jest w postaci cieniutkiej warstwy o grubości ok. 1-3 mikrometrów [6]. Ogniwa III generacji pozbawione są klasycznego złącza P-N, jak w przypadku 2 pierwszych generacji. Największy potencjał mają ogniwa DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) oraz organiczne z wykorzystaniem polimerów. Panele trzeciej generacji bazują na wielu technologiach, np. nietoksyczne materiały organiczne [7] oraz grafen [8]. Największą zaletą takich ogniw jest ich niski koszt produkcji oraz absorpcja (pochłanianie) światła dochodząca nawet do 90%. Niestety obecnie ogniwa tego typu osiągają niską sprawność, na poziomie kilku procent.

Jednym z najnowszych osiągnięć w fotowoltaice jest zastosowanie perowskitów, czyli nieorganicznych związków chemicznych [9]. Technologia ta nie wymaga stosowania skomplikowanych urządzeń i charakteryzuje się szybkim czasem produkcji. Od kilku lat trwają prace nad możliwością produkcji perowskitowych ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem druku atramentowego. Ten sposób pozwoli na budowę modułów fotowoltaicznych o dowolnym kształcie. Obecnie sprawność ogniw perowskitowych dochodzi do 20%, natomiast wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że w przyszłości sprawność może osiągnąć nawet 30%.

W ostatnich latach pojawiło się ciekawe rozwiązanie modułów dwustronnych (określanych jako bifacialne), mogących wykorzystywać również światło odbite, które do nich dociera także z tyłu. Dzięki temu rozwiązaniu wydajność modułu jest wyższa, ponieważ wykorzystywana jest większa ilość światła [10].

Branża fotowoltaiki w Polsce rozwija się bardzo dynamicznie. Do końca 2020 r. instalacje fotowoltaiczne, włączone do polskiego systemu energetycznego, osiągnęły moc blisko 4 GW. Oznacza to przyrost o ponad 250% w skali roku [11]. Taka popularność fotowoltaiki, związana jest głównie z jej licznymi zaletami, m.in.:

- instalacja fotowoltaiczna nie powoduje emisji zanieczyszczeń lub substancji szkodliwych do otoczenia,
- instalacja fotowoltaiczna nie powoduje emisji hałasu,
- instalacja fotowoltaiczna może zapewnić niezależność energetyczną,
- niskie koszty eksploatacji,
- stosunkowo szybki okres zwrotu inwestycji,
- okres realizacji inwestycji zajmuje zaledwie kilka tygodni, zatem jest to tempo nieporównywalnie szybkie w porównaniu do realizacji instalacji innych OZE,
- liczne systemy wsparcia dla posumentów (np. programy Mój prąd, Czyste Powietrze, itp.).

W 2020 r. Centrum Badań Marketingowych „Indicator” przeprowadziło badania, mające na celu ocenę różnych rodzajów źródeł energii [12]. Ceny energii elektrycznej są jednym z najważniejszych zagadnień, a rozwój OZE może pozytywnie wpłynąć na zmniejszenie kosztów wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł nieodnawialnych. Turbiny wiatrowe oraz fotowoltaika są obecnie najtańszymi alternatywami dla tradycyjnego sposobu pozyskiwania energii. Fotowoltaika, w przeciwieństwie do turbin wiatrowych jest korzystnie postrzegana w sąsiedztwie zamieszkania. Zwiększenie produkcji energii poprzez rozbudowę OZE umożliwi zmniejszenie importu energii z zagranicy. Polacy w OZE upatrują szansę na ograniczenie emisji zanieczyszczeń do środowiska oraz przeciwdziałanie zmianom klimatu (rys. 1). Odnawialne źródła energii przyczyniają się do powstawania nowych miejsc pracy.



Rys. 1. Korzyści społeczne z OZE [ankieta]

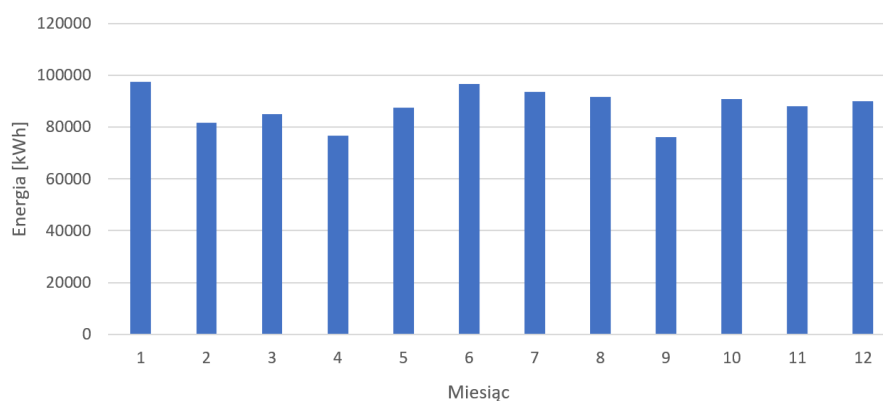
W 2020 r. w KOMAG-u podjęto działania dotyczące poprawy efektywności energetycznej obiektów przemysłowych. Jednym z realizowanych tematów było przeprowadzenie analizy efektywności energetycznej wpływu zbudowania dodatkowych instalacji fotowoltaicznych, na zużycie energii elektrycznej. Analizy wykonywano w celu uzyskania odpowiedzi na pytanie o zasadność podjęcia tego typu inwestycji. Główne założenie, które przyjęto podczas realizacji pracy to maksymalne wykorzystanie powierzchni dachów obiektów. Analizy wykonano na przykładzie budynków ITG KOMAG, z uwzględnieniem przeszkód, powodujących zacinienie paneli fotowoltaicznych. Zacinienie jest zjawiskiem, które powoduje niejednorodne napromieniowanie paneli fotowoltaicznych i tym samym ma bezpośredni wpływ na zmniejszenie produkcji energii elektrycznej z systemu PV. Aby złagodzić te objawy, w literaturze przedstawiono różne metody, w tym rekonfigurację połączenia paneli PV (Bridge Linked, Series Parallel, Total Cross Tied i Honeycomb) [13], stosowanie optymalizatorów mocy lub usunięcie zaciennionych paneli z instalacji na etapie projektowania, wykorzystując metodę analizy zacinienia.

Analizy wykonywano z zachowaniem zasad zawartych w normie PN-HD 60364-7-712:2016 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania [14]. Analiza efektywności energetycznej została poprzedzona licznymi działaniami, mającymi na celu:

- zidentyfikowanie zużycia i kosztów energii elektrycznej,
- zidentyfikowanie wymiarów budynków oraz zabudowy na dachach,

- utworzenie modeli budynków wraz z elementami mogącymi powodować zacinienie paneli fotowoltaicznych,
- zaproponowanie rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych na wytypowanych powierzchniach dachowych, z uwzględnieniem orientacji budynków,
- przeprowadzenie analizy zacinienia i modyfikację rozmieszczenia paneli, uwzględniając równowagę pomiędzy maksymalizacją uzysku energetycznego, a kosztami inwestycji,
- utworzenie wizualizacji instalacji fotowoltaicznych, na wykonanych modelach budynków,
- wstępny dobór podzespołów instalacji, tj. panele PV, falowniki, przewody i zabezpieczenia,
- opracowanie prognozy produkcji energii elektrycznej i określenie okresu zwrotu.
- oszacowanie masy paneli i konstrukcji wsporczych w celu walidacji nośności konstrukcji dachowych (w tym etapie nie przewidujemy samej walidacji),
- oszacowanie kosztów podzespołów instalacji fotowoltaicznych.

Na rysunku 2 przedstawiono roczny profil zużycia energii elektrycznej w KOMAG-u w poszczególnych miesiącach 2019 r. Profil ten uwzględnia uzysk z instalacji fotowoltaicznej o mocy 10,725 kW, która działa w systemie energetycznym KOMAG-u od połowy 2018 r.



Rys. 2. Profil zużycia energii elektrycznej w ITG KOMAG (2019 r.)

Przeprowadzenie takiej analizy wstępnej, za każdym razem jest podstawą do symulacji uzysku i okresu zwrotu inwestycji.

2. Zasady projektowania instalacji fotowoltaicznej

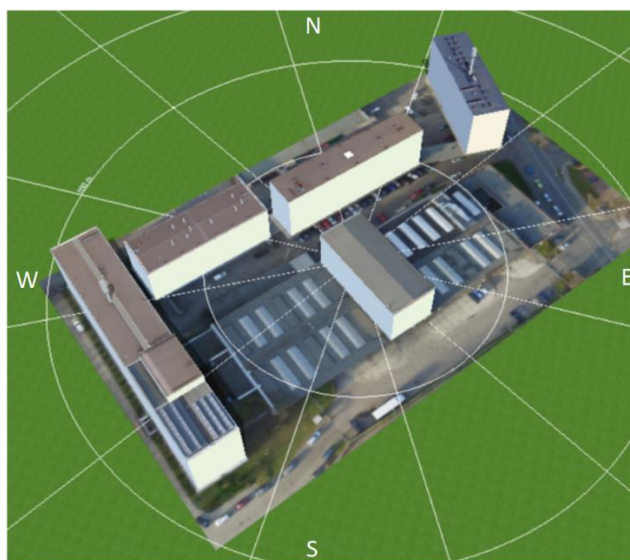
2.1. Modelowanie budynków

W celu rzetelnej realizacji pracy, z wynikami, zbliżonymi do uzysków rzeczywistych, konieczne było odpowiednie przygotowanie modeli 3D budynków. Na rysunku 3 zaznaczono powierzchnie dachów, które po wstępnej analizie zostały wytypowane, jako możliwe do zabudowania panelami fotowoltaicznymi. Pozostałe dachy odrzucono, ze względu na całkowite zacinienie poprzez wyższe budynki lub zbyt dużą liczbą elementów ograniczających powierzchnie montażowe.



Rys. 3. Widok terenu KOMAG-u z zaznaczonymi potencjalnymi miejscami montażu instalacji fotowoltaicznych

W procesie projektowania utworzono modele wszystkich obiektów z wykorzystaniem fotogrametrii niskopułapowej (z zastosowaniem drona). Uzyskane modele nie nadawały się jednak bezpośrednio do zastosowania w oprogramowaniu PV*SOL, ze względu na ograniczenia zastosowanej technologii. Dokładność tworzenia modeli z zastosowaniem fotogrametrii, nie pozwala na wygenerowanie płaszczyzn, które są niezbędne do utworzenia powierzchni do instalacji paneli fotowoltaicznych. W związku z tym, modele budynków zostały utworzone bezpośrednio w oprogramowaniu PV*SOL, które służy do projektowania instalacji fotowoltaicznych. Modele 3D uzyskane z fotogrametrii, posłużyły do zwymiarowania budynków. Widok modeli wszystkich budynków poddanych analizie pod kątem instalacji fotowoltaicznych, zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Widok zamodelowanych budynków w oprogramowaniu PV*SOL

Na modelach naniesiono wszystkie elementy, mające bezpośredni wpływ na rozmieszczenie lub działanie instalacji fotowoltaicznych, tj. anteny, świetliki, kominy, nadbudówki lub wyłazy dachowe.



2.2. Orientacja budynków

Podczas próby rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych bardzo często pojawia się zagadnienie związane z ich orientacją. Nie zawsze jest możliwość ustawienia paneli PV dokładnie w kierunku południowym, w którym wydajność paneli jest najbardziej korzystna. Odchylenie powierzchni paneli od strony południowej o ponad 30° powoduje znaczne straty. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę kąt pochylenia paneli. Wybór odpowiedniego położenia i pochylenia paneli fotowoltaicznych to bardzo ważna sprawa, od której bezpośrednio zależy uzysk energii. Optymalny kąt nachylenia dla modułów PV w przypadku Polski, mieści się w przedziale od około 20 do 50 stopni, w zależności od lokalizacji i pory roku. Moduł PV ustawiony odpowiednio do kąta nasłonecznienia (azymut 180°) przynosi największy uzysk (tabela 1).

Zestawienie dostępności energii słonecznej w zależności od orientacji i pochylenia [15]

Tabela 1



Nachylenie płaszczyzny	Zachód	Południowy zachód		Południe	Południowy wschód		Wschód
	270°	240°	210°	180°	150°	120°	90°
90°	51%	62%	69%	72%	70%	63%	52%
80°	58%	71%	80%	82%	80%	71%	51%
70°	65%	78%	87%	90%	87%	79%	65%
60°	71%	84%	93%	96%	94%	85%	72%
50°	76%	89%	97%	99%	98%	89%	77%
40°	80%	92%	99%	100%	99%	92%	81%
30°	83%	93%	99%	100%	100%	93%	84%
20°	85%	93%	97%	99%	97%	93%	86%
10°	87%	90%	93%	95%	94%	91%	87%
0°	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%

Pomimo jasno określonych kątów azymutu oraz nachylenia do płaszczyzny, czasem warto rozważyć rozmieszczenie modułów pod innym kątem. Nawet jeśli pojedynczy moduł PV będzie generował mniej energii, to może okazać się, że cała instalacja będzie bardziej wydajna. Zwiększenie kąta nachylenia względem płaszczyzny dachu będzie wymagało zastosowania dodatkowego zabezpieczenia przed wiatrem. Mniejszy kąt ustawienia, np. 10° lub 15°, może pozwolić na montaż większej liczby modułów, ponieważ zmniejszą się odległości między rzędami (ze względu na mniejszy obszar zacienienia za rzędem paneli) i tym samym można osiągnąć większy uzysk energii.

Budynki ITG KOMAG są odchyłone od południa o około 37° w kierunku zachodnim. Na podstawie informacji o położeniu słońca i orientacji analizowanych obiektów, oprogramowanie PV*SOL wykonuje i analizuje zacienienie paneli fotowoltaicznych. W celu pozyskania wiedzy na temat wpływu rozmieszczenia paneli na spodziewane uzyski, przeprowadzono porównanie wyników podczas ustawienia paneli dokładnie w kierunku południowym (azymut 180°), a rozmieszczeniem równo z krawędzią dachu. W tabeli 2 zaprezentowano najważniejsze dane, umożliwiające porównanie dwóch wirtualnych instalacji fotowoltaicznych.

Porównanie uzysku z instalacji zorientowanej pod różnymi kątami

Tabela 2

Panele skierowane na południe (180°)	Panele równo z krawędzią budynku (217°)
	
Moc generatora: 16,5 kW	Moc generatora: 17,4 kW
Liczba modułów PV: 55	Liczba modułów PV: 58
Energia wyprodukowana: 16845 kWh	Energia wyprodukowana: 17477 kWh
Spec. uzysk roczny: 1020,88 kWh/kW	Spec. uzysk roczny: 1004,40 kWh/kW
Stosunek wydajności (PR)*: 88,7%	Stosunek wydajności (PR)*: 89,6%
Koszt inwestycji: 82500 zł	Koszt inwestycji: 87000 zł
Okres amortyzacji: 12,9 lat	Okres amortyzacji: 13 lat

Powyższe porównanie wykazało, że ustawianie paneli fotowoltaicznych równo w kierunku strony południowej jest nieuzasadnione. Dzięki umieszczeniu o 3 paneli więcej, przy tej samej dostępnej powierzchni dachu, okres zwrotu obu inwestycji jest niemal identyczny, a przy zastosowaniu równego ułożenia paneli względem krawędzi dachu, uzyskano większy współczynnik wydajności PR, służący do oceny jakości systemu i wyrażany przez stosunek bieżącej produkcji systemu PV do promieniowania słonecznego odebranego przez instalację.

2.3. Planowanie rozmieszczenia paneli

Podczas planowania rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych należy wziąć pod uwagę m.in.:

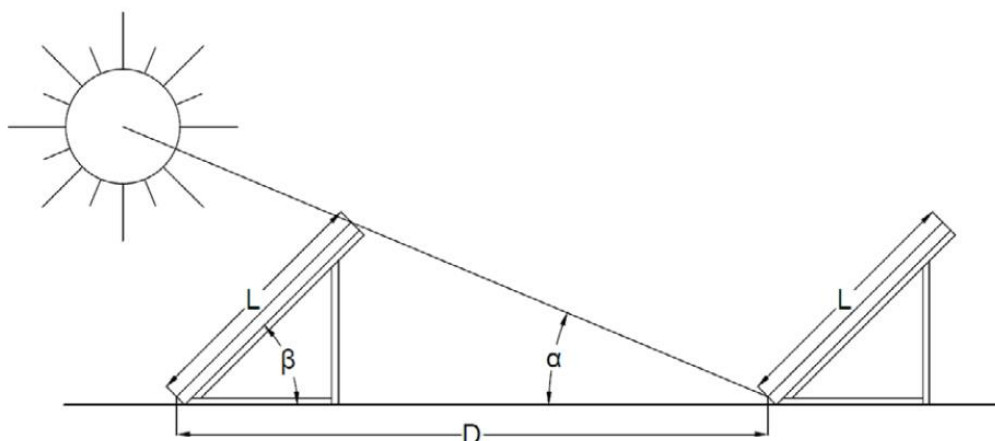
- dostępną powierzchnię,
- odległości między rzędami paneli,
- odległości od krawędzi dachu,
- rodzaj konstrukcji wsporczej (inwazyjna, balastowa),
- kierunek ułożenia paneli PV (pionowy, poziomy),
- kąty nachylenia powierzchni,
- przeszkody.

W instalacji fotowoltaicznej ważne jest, aby kolejne rzędy paneli nie zacięniały się nawzajem (rys. 5). Minimalną odległość między rzędami oblicza się na dzień 22 grudnia (gdy słońce jest najniżej na niebie w ciągu roku) z zależności (1) [15]:

$$D = \frac{L \cdot \sin(180^\circ - (\alpha + \beta))}{\sin(\beta)} \quad (1)$$

gdzie:

- D - odległość pomiędzy rzędami paneli [m],
- L - wysokość panelu PV [m],
- α - kąt padania promieni słonecznych,
- β - kąt nachylenia konstrukcji wsporczej.



Rys. 5. Zasada obliczania odległości pomiędzy rzędami paneli PV [15]

Bezpieczeństwo użytkowania i ochrona przeciwpożarowa wymagają zastosowania się do obowiązujących zasad, tj.:

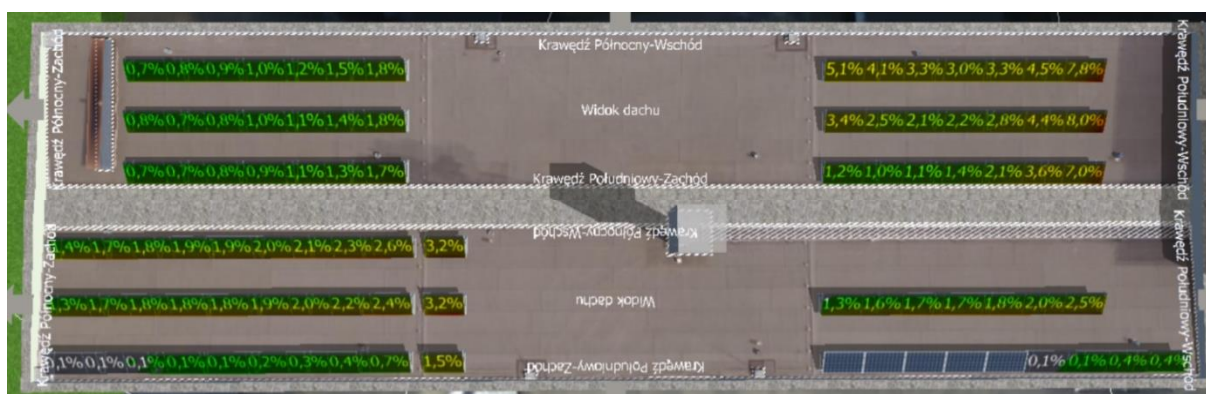
- Nie można pogorszyć funkcji spełnianych przez ściany ogniowe i działowe w budynkach.
- Ściany ogniowe i działowe w budynkach nie mogą zostać zabudowane przez moduły PV.
- Należy zachować dostateczną odległość pomiędzy instalacją PV a ścianami ogniowymi i działowymi w budynku. Odległość ta może zostać określona na podstawie obowiązującej ustawy lub ustalona przez rzeczoznawcę.
- Na etapie projektowania dachowej instalacji PV, należy zadbać o zachowanie odpowiednich odległości modułów PV od krawędzi dachu, w celu umożliwienia konserwacji i zapewnienia bezpiecznego gaszenia w przypadku pożaru. Żadne przepisy nie określają żadnych wymagań, natomiast w praktyce często przyjmuje się, że minimalna odległość modułów od krawędzi dachu wynosi 50 cm.
- Żadna konstrukcja, która jest montowana na dachu, nie może utrudniać usuwania śniegu ani odprowadzania wody podczas deszczu.
- Wszystkie podzespoły instalacji fotowoltaicznej, łącznie z konstrukcją wsporczą, muszą charakteryzować się wysoką odpornością na warunki atmosferyczne.
- Zastosowana konstrukcja nie może zwiększać zagrożenia pożarowego. W przypadku instalacji dachowych należy przewidzieć drogi pożarowe.
- Na etapie projektowania instalacji należy przewidzieć odpowiednie ciągi komunikacyjne, w celu zachowania dostępu do istniejącej infrastruktury dachowej (kominy, anteny, sprzężarki klimatyzacji, itp.).
- Należy podłączyć instalację fotowoltaiczną do istniejącej instalacji odgromowej, a w przypadku jej braku, w celu ochrony urządzeń należy przewidzieć konieczność wykonania nowej instalacji odgromowej.
- Należy również pamiętać o często ignorowanej kwestii estetyki budynku. Nie może ona być pogorszona przez instalację fotowoltaiczną.

2.4. Analiza zacienienia

Jednym z najistotniejszych zagadnień, które należy wziąć pod uwagę projektując instalację fotowoltaiczną jest możliwość występowania zacienienia. Instalacje fotowoltaiczne, w celu podniesienia napięcia w obwodzie, składają się z szeregowo połączonych ze sobą modułów fotowoltaicznych. W przypadku połączenia szeregowego, ważne jest, aby wszystkie moduły działały

z podobną (najlepiej maksymalną) wydajnością. Zacienienie któregośkolwiek modułu PV będzie wpływało negatywnie na cały obwód, powodując straty mocy elektrowni fotowoltaicznej, dlatego bardzo ważne jest unikanie rozmieszczania modułów fotowoltaicznych w miejscach zacienianych. Ponadto należy wziąć pod uwagę zacieniania poszczególnych rzędów paneli przez rząd poprzedni, stosując zasady przedstawione w rozdziale 2.3.

W realizowanych pracach, przeprowadzono analizę zacieniania w oprogramowaniu PV*SOL. Obliczenia wykonywane są w procesie rozmieszczania paneli fotowoltaicznych na powierzchniach dachów. Na rysunku 6 przedstawiono średnie procentowe wyniki zacienienia w ciągu dnia, na jednym z budynków. W ramach projektowania instalacji usunięto panele, których stopień zacienienia był zbyt duży. Na dachu budynku jest duża powierzchnia zacieniana przez antenę GSM, w związku z czym w środkowej części dachu nie przewidziano instalacji paneli fotowoltaicznych.



Rys. 6. Wyniki symulacji zacienienia paneli na dachu budynku A (biurowiec)

2.5. Dobór falowników

W projekcie instalacji fotowoltaicznej, w pierwszej kolejności należy rozmieścić panele PV na dostępnej powierzchni, zachowując odpowiednie wymagania. Moc falownika dobierana jest do mocy zastosowanych paneli fotowoltaicznych. W projekcie wstępnym zastosowano panele PV LG340N1C-A5 o mocy 340 W.

Podczas doboru falownika do instalacji fotowoltaicznej, można spotkać różne warianty konfiguracji. W tym celu wprowadzono pojęcie stosunku mocy SM, wyrażany zależnością (2) [16].

$$\text{stosunek mocy SM} = \frac{\text{moc pola modułów [W]}}{\text{nominalna moc AC falownika [W]}} * \text{sprawność falownika [\%]} \quad (2)$$

Możliwe są trzy warianty doboru stosunku mocy:

- jeżeli $SM < 100\%$, falownik jest niedociążony, ponieważ suma mocy nominalnej modułów jest mniejsza od mocy nominalnej falownika,
- jeżeli $SM = 100\%$, falownik jest obciążony mocą nominalną – suma mocy paneli jest równa mocy nominalnej falownika,
- jeżeli $SM > 100\%$, falownik jest przeciążony, ponieważ suma mocy nominalnej modułów jest większa od mocy nominalnej falownika.



W Europie Centralnej w przypadku instalacji skierowanych na południe należy przyjąć wartość SM, z przedziału pomiędzy 80% a 125%. Instalacje montowane w kierunkach wschód-zachód mogą być przewymiarowane w stosunku do mocy falownika nawet o 160% (zależy to dodatkowo od nachylenia dachu). Optymalną wartość SM należy obliczyć biorąc pod uwagę specyficzne dane konkretnej instalacji PV, tj.: lokalizację, rodzaj i orientację modułów PV oraz sposób ich połączenia z falownikiem (podział na stringi). Oprogramowanie do projektowania instalacji fotowoltaicznych powinno umożliwiać sprawdzenie parametrów zaprojektowanych stringów w stosunku do zakresów napięć poszczególnych wejść MPPT (Maximum Power Point Tracking) falownika. W analizowanych instalacjach przyjmowano wartość SM zbliżoną do 100%.

2.6. Dobór przewodów

Warunkiem bezpiecznej i bezawaryjnej pracy systemu fotowoltaicznego jest właściwy dobór przewodów elektrycznych. Prawidłowo dobrane przewody powodują minimalizację strat mocy całego systemu PV. Panele fotowoltaiczne zwykle wyposażone są oryginalnie w przewody przyłączeniowe o długości 2x1 m oraz o przekroju żyły 4 mm². Przekroje przewodów DC z paneli fotowoltaicznych do falownika, należy wyznaczyć z zależności (3) [15]:

$$S = \frac{I_{MPP} * l_r}{U_{MPP} * \gamma * W} \quad (3)$$

gdzie:

S - przekrój przewodu [mm²],

I_{MPP} - natężenie prądu w punkcie maksymalnej mocy [A],

l_r - łączna długość kabla (pętli) między stringiem, a falownikiem [m],

U_{MPP} - napięcie łańcucha fotowoltaicznego [V],

γ - współczynnik przewodności właściwej miedzi [$\frac{S \cdot m}{mm^2}$].

W - dopuszczalna strata w przewodach [%].

W obwodach fotowoltaicznych przyjmuje się, że maksymalny poziom strat w przewodach wynosi 1%. Zakłada się zastosowanie przewodów miedzianych o przewodności właściwej 56 [$\frac{S \cdot m}{mm^2}$]. Po przeprowadzeniu obliczeń, należy dobrać przewód, o przekroju najbliższej większej wartości z typoszeregu.

Przekroje przewodów AC z falownika do rozdzielni, wyznacza się ze wzoru (4) [15]:

$$S = \frac{P_f * l_{rf}}{U_r^2 * \gamma * W} \quad (4)$$

gdzie:

P_f - moc nominalna falownika,

l_{rf} - długość przewodu między rozdzielnicą główną, a inwerterem,

U_r - napięcie nominalne wyjścia AC falownika (400 V),

γ - współczynnik przewodności właściwej miedzi,

W - dopuszczalna strata w przewodach (1%).



Oprócz doboru przekrojów, należy dodatkowo pamiętać o wymganiach, takich jak odporność izolacji na warunki atmosferyczne (temperatura, wilgotność, promieniowanie UV) oraz uszkodzenia mechaniczne. Przewody dobrane do instalacji fotowoltaicznych powinny się charakteryzować trwałością przez minimum 20 lat.

2.7. Dobór zabezpieczeń

Ze względu na charakter działania instalacji fotowoltaicznej, która jest narażona na czynniki zewnętrzne, konieczne jest stosowanie dodatkowej ochrony w postaci ograniczników przepięć (SPD). Ograniczniki mają za zadanie ochronę instalacji przed przepięciami, które mogą zaistnieć zarówno od wyładowań atmosferycznych, jak i występować w momencie łączenia instalacji. Urządzenia te dobiera się w taki sposób, aby napięcie maksymalne wszystkich urządzeń wchodzących w skład instalacji fotowoltaicznej, było mniejsze niż napięcie zadziałania ogranicznika. Zabezpieczenia SPD stosuje się po obu stronach instalacji (AC oraz DC).

Zabezpieczenia po stronie DC

Sposób ochrony przeciwprzepięciowej zależy od odległości pomiędzy falownikiem a panelami fotowoltaicznymi. Jeżeli odległość ta jest większa niż 10 m, należy umieścić dwa ograniczniki przepięć – jeden przy panelach PV, a drugi przed inwerterem. SPD wymaga bezpośredniego podłączenia do szyn zbiorczych PE, łączonych przewodem o przekroju minimum 16 mm². W związku z koniecznością stosowania zabezpieczeń SPD przy panelach, konieczne jest zastosowanie dodatkowej skrzynki przyłączeniowej, w której zabudowany zostanie SPD, szyna PE oraz trójniki MC4, za pomocą których będą połączone łańcuchy paneli.

W przypadku łączenia stringów fotowoltaicznych równolegle, należy rozważyć zastosowanie bezpieczników gPV. Norma PN-HD 60364-7-712 nakazuje zastosowanie zabezpieczeń przetężeniowych w przypadku równoległego łączenia więcej niż 2 stringów (pkt. 712.433.101). Norma wymaga również zastosowania możliwości odłączenia strony DC od falownika. Współczesne falowniki mają wbudowane wyłączniki DC, w związku z tym nie ma konieczności stosowania dodatkowych wyłączników.

Zabezpieczenia po stronie AC

Podobnie w przypadku strony DC – jeśli odległość falownika od rozdzielni jest większa niż 10 m, należy zastosować podwójne zabezpieczenia SPD. Ze względów bezpieczeństwa należy zastosować wyłączniki nadprądowe, odpowiednie do mocy podłączanych falowników.

2.8. Szacowanie masy

W niniejszym punkcie przedstawiono zestawienie masy poszczególnych instalacji fotowoltaicznych na obiektach ITG KOMAG (tabela 3). Zgromadzone dane umożliwią przeprowadzenie analizy nośności konstrukcji dachowych, które powinny być przeprowadzone przez eksperta, przed montażem instalacji. Masa pojedynczego panelu PV wynosi około 18 kg. Masa konstrukcji wsporczej na 4 panele ułożone poziomo, zależy od kąta pochylenia i wynosi od 16,2 do 17,3 kg. Do obliczeń przyjęto wartość maksymalną. Powierzchnia zajmowana przez konstrukcję wsporczą na 4 panele wynosi około 7 m², więc nacisk konstrukcji z panelami PV na powierzchnię dachu wynosi około 12,7 kg/m².

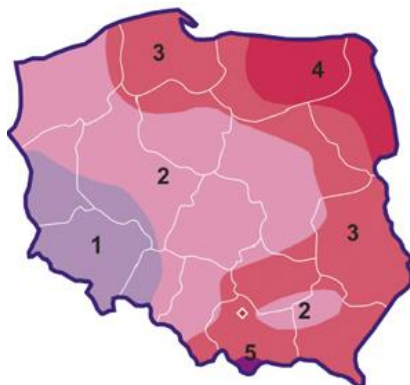
Zestawienie masy konstrukcji na poszczególnych budynkach

Tabela 3

Budynek	Liczba paneli PV [szt]	Masa paneli [kg]	Masa konstrukcji [kg]	Masa łączna [kg]
Budynek A (biurowiec)	88	1584	380,6	1964,6
Budynek boczny niski	54	972	242,2	1214,2
Budynek boczny wysoki	104	1872	449,8	2321,8
Hala wysoka	138	2484	605,5	3089,5
Biurowiec od ul. Łużyckiej	52	936	224,9	1160,9

Podczas projektowania instalacji fotowoltaicznej, oprócz masy samych ogniw PV (ok. 18 kg/m²) i elementów konstrukcyjnych, należy również uwzględnić opady śniegu, który będzie powodował dodatkowe obciążenie konstrukcji dachu. Jeden metr sześcienny śniegu w postaci puchu waży około 200 kg. Ta sama objętość śniegu mokrego waży już około 800 kg, natomiast w przypadku śniegu topniejącego może ważyć nawet 900 kg.

Zgodnie z normą PN-EN 1991-1-3:2005 obszar Polski został podzielony na 5 stref obciążenia śniegiem [15]. Podział ten przedstawiono na rysunku 7. Strefy różnią się obciążeniem śniegu, które zależy głównie od częstotliwości opadów śniegowych. W zależności od strefy, liczba dni z występującymi opadami śniegowymi w Polsce waha się pomiędzy 20 a 80.



Rys. 7. Podział Polski na strefy obciążenia śniegiem [18]

W tabeli 4 zestawiono wartości charakterystycznego obciążenia śniegiem gruntu w Polsce.

Wartości charakterystycznych obciążenia śniegiem gruntu q_s w Polsce, w odniesieniu do poszczególnych stref [19]

Tabela 4

Strefa	1	2	3	4	5
q_s [N/m ²]	7H-1,4 $q_s \geq 700$	900	6H-0,6 $q_s \geq 1200$	1600	930exp (0,00134H) $q_s \geq 2000$

Wartość H to wysokość nad poziomem morza wyrażona w metrach

Przedstawione obciążenia dotyczą pionowego nacisku na powierzchnię poziomą, czyli siła nacisku była skierowana prostopadle do powierzchni. Panele fotowoltaiczne zazwyczaj jednak są montowane pod pewnym kątem ϕ do powierzchni ziemi. W takim przypadku ciśnienie obciążeniem śniegu ma niższą wartość w stosunku do działającego na powierzchnię poziomą. Stąd też wartość ciśnienia obciążenia śniegu, działającego na pochyłą powierzchnię generatora PV, można obliczyć z zależności:

$$q_{sk} = q_s * \cos \phi \quad (5)$$

gdzie:

q_{sk} – ciśnienie obciążenia śniegiem działające na powierzchnię pochyłą [N/m^2],

q_s – ciśnienie obciążenia śniegiem działające na powierzchnię poziomą [N/m^2],

ϕ – kąt nachylenia powierzchni do poziomu [$^\circ$].

3. Kosztorys

Na podstawie opracowanych założeń technicznych instalacji fotowoltaicznych na dachach obiektów ITG KOMAG, w tabeli 5 zestawiono elementy składowe instalacji (ceny z maja 2020 r.). Przedstawiono koszt poszczególnych podzespołów, bazując na aktualnych cenach w sklepach internetowych. W tabeli ujęto szacunkowy koszt montażu systemów fotowoltaicznych, który przyjmuje się jako 10% wartości instalacji. Suma kosztów (powiększona o szacowany koszt montażu) została wprowadzona do oprogramowania PV*SOL i była podstawą do oszacowania zysków i okresu zwrotu inwestycji.

Zestawienie kosztów zaplanowanych instalacji fotowoltaicznych

Tabela 5

Lp.	Typ	Nazwa	Ilość	Cena zł/szt	Cena zł/kpl
1	Moduł PV	LG340N1C-A5	436	850	370600
2	Falownik 25kW	SMA Sunny Tripower 25000TL-30	1	12000	12000
3	Falownik 20kW	SMA Sunny Tripower 20000TL-30	1	11800	11800
4	Falownik 17,5kW	FRONIUS Symo 17.5-3-M	4	11000	44000
5	Falownik 15kW	FRONIUS Symo 15.0-3-M	2	10500	21000
6	Optymalizator mocy	TIGO TS4-R-O	20	200	4000
7	Kabel PV	Przewód DC 4 mm ²	1478	2,5	3695
8	Kabel PV	Przewód DC 6 mm ²	934	3	2802
9	Kabel PV	Przewód DC 10 mm ²	460	4	1840
10	Kabel PV	Przewód AC 3-fazowy 6 mm ²	30	9	270
11	Kabel PV	Przewód AC 3-fazowy 16 mm ²	100	25	2500
12	Kabel PV	Przewód instalacyjny 16 mm ² żółto-zielony	150	6	900
13	Komponenty	Złącza MC4	48	4	192
14	Komponenty	Trójnik MC4	16	32	512
15	Komponenty	Zabezpieczenie przeciwprzepięciowe z uziemieniem 1+2	38	800	30400
16	Komponenty	Wyłącznik ochronny przewodu B 32A	6	100	600
17	Komponenty	Wyłącznik ochronny przewodu B 40A	1	123	123
18	Komponenty	Wyłącznik ochronny przewodu B 25A	2	90	180
19	Komponenty	Skrzynka przyłączeniowa	15	126	1890
20	Konstrukcja	Konstrukcja wsporcza (na 4 szt. paneli)	109	720	78480
21	Konstrukcja	Akcesoria montażowe	1	20000	20000
22	Usługa	Montaż instalacji	1	60000	60000
				SUMA	667784



4. Podsumowanie

Pierwszym krokiem w projektowaniu systemu PV było wybranie miejsc zainstalowania paneli fotowoltaicznych na dachach budynków KOMAG-u, uwzględniając dostępną powierzchnię, ekspozycję na promienie słoneczne oraz przeszkody, mogące zacieniać instalacje. Następnie określono sposób montażu paneli PV i dobrano odpowiednie konstrukcje wsporcze. Kolejnym krokiem była analiza rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych na dachach budynków (z uwzględnieniem odpowiednich odległości od krawędzi dachów, instalacji odgromowych, z zachowaniem korytarzy serwisowych) oraz analiza zacienienia paneli. W następnym kroku określono konkretne modele paneli fotowoltaicznych oraz inwerterów, dopasowanych energetycznie do liczby paneli i ich rozmieszczenia. Połączenie paneli fotowoltaicznych i inwerterów wymaga skonfigurowania łańcuchów (stringów) oraz dobrania odpowiednich zabezpieczeń i przewodów po stronie DC i AC.

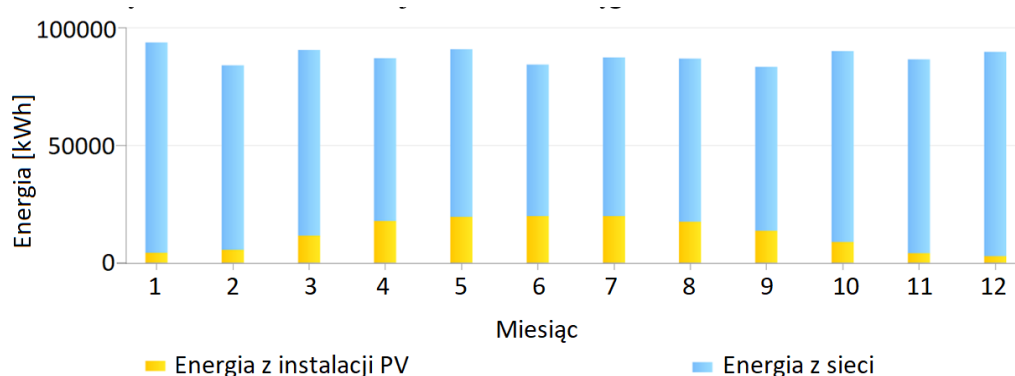
Wszystkie prowadzone wcześniej prace, tj. modelowanie budynków, rozmieszczenie paneli, analiza zacienienia i dobór podzespołów, umożliwiły przeprowadzenie symulacji działania systemu fotowoltaicznego w oprogramowaniu PVSol Premium. W tabeli 6 zestawiono najważniejsze dane techniczne wszystkich instalacji PV oraz oszacowane roczne uzyski energetyczne. Przyłączenie do sieci energetycznej instalacji powyżej 50 kW (małe instalacje) wiąże się z kilkoma obowiązkami, takimi jak uzyskanie nowych warunków przyłączenia oraz konieczność rejestracji przedsiębiorstwa jako wytwórcy energii elektrycznej. Wytwarzanie energii elektrycznej z małej instalacji fotowoltaicznej nie wymaga uzyskania koncesji. Alternatywnym rozwiązaniem jest podzielenie instalacji na kilka mniejszych (poniżej 50 kW) i podłączenie ich do sieci energetycznej przez odrębne liczniki energii. Dodatkową korzyścią podzielenia instalacji jest wyższy współczynnik opustów podczas rozliczania rachunków za energię elektryczną (małe instalacje: 0.7, mikroinstalacje: 0.8), co może nieznacznie wydłużyć okres zwrotu w stosunku do mikroinstalacji. W przypadku analizowanego przedsiębiorstwa, instalacje fotowoltaiczne będą podłączone do jednego licznika energii, zatem należy spełnić przedstawione wymagania.

Zestawienie wyników symulacji

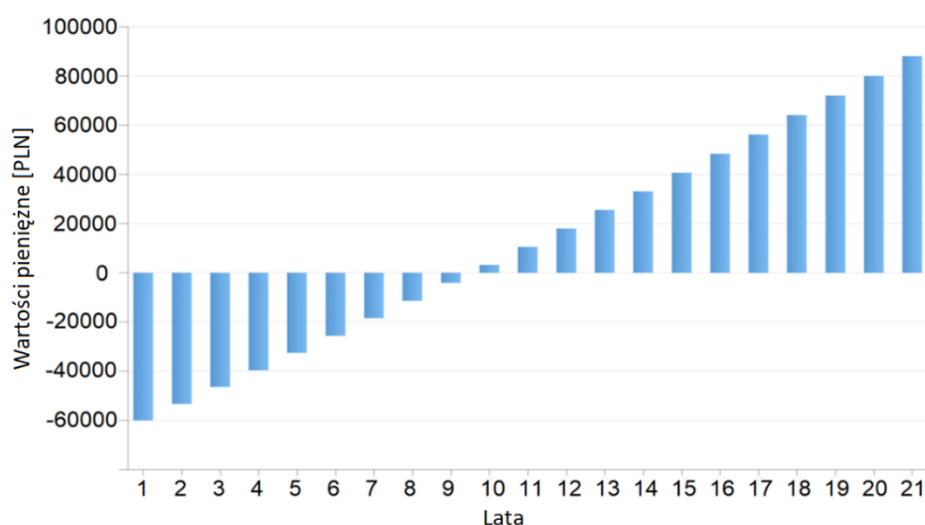
Tabela 6

Moc generatora PV	148,2	kW
Spec. uzysk roczny	977,50	kWh/kW
Stosunek wydajności (PR)	87,3	%
Zmniejszenie uzysku na skutek zacienienia	4,1	%/rok
Udział energii słonecznej w pokryciu zapotrzebowania	13,6	%
Energia wyprodukowana przez system PV (sieć AC)	144 904	kWh/rok
Konsumpcja własna energii	142 412	kWh/rok
Energia oddana do sieci	2 492	kWh/rok
Konsumpcja własna wyprodukowanej energii	98,3	%
Emisja CO ₂ , której dało się uniknąć:	68 105	kg / rok

Przeprowadzona analiza pokazuje, że energia uzyskana z przedstawionych instalacji fotowoltaicznych pokryje 13,6% zapotrzebowania KOMAG-u na energię elektryczną (rys. 8). Ze względu na charakter działalności instytutu i profil zużycia energii, konsumpcja własna wyniesie ponad 98%. Dzięki temu można będzie uniknąć niemal 70 ton emisji dwutlenku węgla rocznie. Przy wysokim stopniu konsumpcji własnej wyprodukowanej energii elektrycznej (ponad 98%), małe znaczenie ma procent upustów przy rozliczaniu płatności za energię elektryczną.



Rys. 8. Prognoza uzysku rocznego



Rys. 9. Symulacja przychodów z instalacji PV

Całkowity koszt inwestycji, wynoszący blisko 670 tys. zł, zwróci się w 10 roku użytkowania instalacji, a w kolejnych latach przyniesie znaczne korzyści generując około 900 tys. zł po kolejnych 11 latach działania (rys. 9). Okres zwrotu inwestycji (symulowany przez oprogramowanie do projektowania instalacji fotowoltaicznych) może ulec skróceniu w przypadku pozyskania dofinansowania z systemów wsparcia, oferowanych przy tego typu inwestycjach. Korzyści mogą być wyższe, ponieważ okres użytkowania paneli fotowoltaicznych przewidziany jest na ponad 25 lat. Gwarancje udzielane przez producentów paneli mówią o zachowaniu przynajmniej 80% wydajności nominalnej po 25 latach użytkowania.

Literatura

1. Lis P., Sekret R.: Efektywność energetyczna budynków - Wybrane zagadnienia problemowe. (2016) Rynek Energii, 6 (127), pp. 29-35.
2. Dołęga W.: Efektywność energetyczna w aspekcie bezpieczeństwa dostaw energii i bezpieczeństwa ekologicznego. (2014) Rynek Energii, 111 (2), pp. 24-28.
3. Din S.: Combined power of perovskites and silicon solar cells. *Vakuum in forschung und praxis*. Volume: 29, Issue: 3, pp. 22-26.



4. Dasari M., Balaraman RP., Kohli P.: Photovoltaics and Nanotechnology as Alternative Energy. Book Series: Environmental Chemistry for a Sustainable World Volume: 14 Pages: 211-241.
5. <https://www.ieo.pl/pl/aktualnosci/1534-dominacja-modulow-monokrystalicznych> [dostęp 27.05.2020].
6. Lima RDC., Gurupad NN., Shinde O., Schneller E., Pinheiro WA., Ferreira CL., Cruz LR., Fonseca MG., de Medeiros RA.: Characterization of CIGS thin film solar cells. *Materia*, Rio de Janeiro, 2017, Volume: 22 Supplement: 1, Article Number: e-11925.
7. Vogelbaum HS., Sauve G.: Recently developed high-efficiency organic photoactive materials for printable photovoltaic cells: a mini review. *Synthetic metals* 2017, Volume: 223, Pages: 107-121.
8. Mahmoudi T; Wang Y; Hahn YB: Graphene and its derivatives for solar cells application. *Nano energy* 2018, Vol. 47, pp. 51-65.
9. Demic S., Ozcivan AN., Can M., Ozbek C., Karakaya M.: Recent Progresses in Perovskite Solar Cells. *Nanostructured solar cells*, 2017, DOI: 10.5772/62516, pp. 277-304.
10. <https://fotowoltaikaonline.pl/panele-bifacial> [dostęp 27.05.2020].
11. Rynek fotowoltaiki w Polsce 2020. Raport Instytutu Energii Odnawialnej (Photovoltaic market in Poland 2020. Report of the Renewable Energy Institute).
12. <https://stowarzyszeniepv.pl/2020/05/10/badanie-opinii-polakow-na-temat-roznych-zrodel-energii> [dostęp 1.03.2020].
13. Sharma M., Pareek S., Singh K.: Performance analysis of various configurations of solar photovoltaic arrays to mitigate the effects of partial shading conditions. (2020) AIP Conference Proceedings, 2294, art. no. 040008.
14. Norma PN-HD 60364-7-712:2016-05 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania.
15. Szymański B.: Instalacje fotowoltaiczne. GLOBEnergia, Kraków, 2017, ISBN 978-83-65874-00-9.
16. <https://www.forum-fronius.pl/moc-instalacji-pv-a-moc-falownikow-fronius> [dostęp 1.03.2020].
17. Norma PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1. Oddziaływanie na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływanie ogólne. Obciążenie śniegiem.
18. <https://inzynerbudownictwa.pl/obciazenie-sniegiem-objektow-budowlanych> [dostęp 1.03.2020].
19. Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G.: Wpływ wiatru i śniegu na instalacje fotowoltaiczne w Polsce, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, vol. 74, 2013, Poznań, Polska, str. 253 – 260.