

Joanna KOLAŃSKA-PŁUSKA*, Artur GALLUS*

ANALIZA STATYSTYCZNA DANYCH DO PROGNOZOWANIA PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W WYBRANYM SYSTEMIE FOTOWOLTAICZNYM

W pracy przedstawiono wyniki analizy danych dostarczonych w procesie produkcji energii przez system fotowoltaiczny, które wykorzystano do prognozowania produkcji energii elektrycznej. W pracy podjęto się określenia czynników wpływających na wielkość produkcji energii. Do tego celu zostanie użyta instalacja fotowoltaiczna działająca od kwietnia do lipca 2022 r.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza statystyczna, panele fotowoltaiczne, OZE.

1. WPROWADZENIE

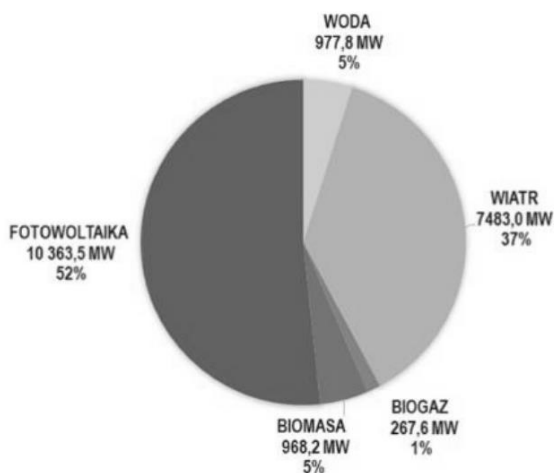
Prognozowanie produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii można rozpatrywać dla kilku różnych elementów [1, 2, 9]:

- ultrakrótkoterminowych (od kilku minut do kilku godzin),
- krótkoterminowym (do kilkudziesięciu godzin),
- średnioterminowym (od kilku do kilkudziesięciu dni),
- długoterminowym (od kilku miesięcy do kilkudziesięciu lat).

Prognozy ultrakrótkoterminowe są głównie wykorzystywane do sterowania odbiorami, magazynami i źródłami energii w celu zbilansowanie podsystemów energetycznych [7]. Z kolei prognozy średnioterminowe mają zastosowanie w planowaniu prac eksploatacyjnych oraz remontowych w systemach elektroenergetycznych. Natomiast prognozy długoterminowe wykorzystuje się do planowania rozwoju sieci oraz systemów elektroenergetycznych. Oprócz określonych norm czasowych istotne są także wielkości które podlegają prognozowaniu. Dla prognoz o krótkich normach wykorzystuje się głównie wartości średniej mocy w przedziale czasowym między 15 minut do 1 godziny. Dla prognoz dłuższych mogą być natomiast istotne inne czynniki takie jak moce szczytowe czy skumulowane energie które zostały produkowane w dłuższym okresie. W przypadku prognoz dobowych wykorzystuje się całkowitą energię wykorzystaną w danym dniu, sumy opadów, całkowitą energię nasłonecznienia, wartości maksymalne

* Politechnika Opolska

(np. temperatura), wartości średnie (np., prędkość wiatru). Produkcja energii elektrycznej poprzez panele fotowoltaiczne jest głównie uzależniona od warunków pogodowych. Jakość prognozy zależy głównie od jej horyzontu. W przypadku prognoz produkcji z OZE należy wymienione horyzonty prognoz zestawić z dostępnymi danymi, dla których opracowywana jest ta prognoza. Najdokładniejsze prognozy możemy uzyskać na podstawie numerycznych prognoz pogody (NWP-Numerical Weather Prediction). Jednak aktualne prognozy pogody o akceptowalnej precyzji są dostępne dla okresów czasu maksymalnie kilkudziesięciogodzinnych. Oznacza to, że możemy je wykorzystać tylko dla prognoz krótkoterminowych oraz ultrakrótkoterminowych. Dodatkowo ze względu na sposób ich wyznaczania dane są te obarczone pewnymi błędami. Wspomniane ograniczenia w możliwościach prognozowania produkcji energii elektrycznej skutkują występowaniem błędów prognozy. Nie można dlatego wskazać jednej prostej formuły, z której można korzystać porównując prognozy. Jest to spowodowane tym że jakość prognozy obliczona z wzorów nie oddaje jej wpływu na proces biznesowy, który jest kluczowy dla funkcjonowania przedsiębiorstwa.

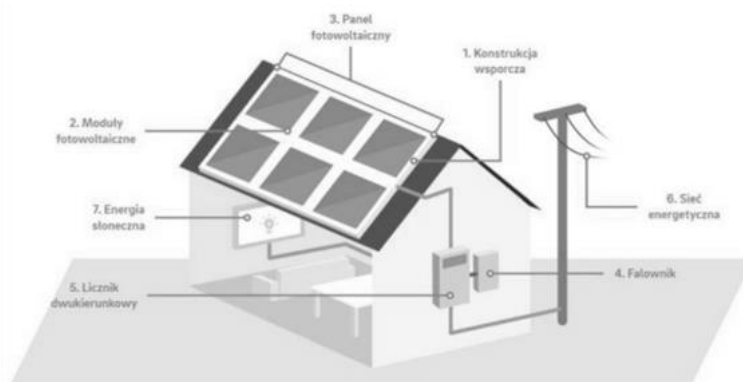


Rys. 1. Struktura mocy OZE – Czerwiec 2022 r. [11, 12, 16]

Jak możemy zauważyć na wykresie ponad 50% mocy produkowanej poprzez OZE jest z fotowoltaiki, Na drugim miejscu są elektrownie wiatrowe [19, 21]. Wynika to z faktu że w czerwcu 2022 r. powstało ponad 24 tysiące nowych instalacji fotowoltaicznych [3].

2. INSTALACJA FOTOWOLTAICZNA

Instalacja fotowoltaiczna zainstalowana jest w Opolu w dzielnicy Kolonia Gośłowicka. Instalacja fotowoltaiczna składa się z 24 paneli fotowoltaicznych każdy po 390 Wp co daje razem 9,36 kWp.



Rys. 2. Przykładowa instalacja fotowoltaiczna na dachu dwuspadowym



Rys. 3. Instalacja fotowoltaiczna wykorzystana do badań

Wybierając panele fotowoltaiczne, które zainstalowano na dachu budynku, kierowano się kilkoma czynnikami. Wśród nich wymienić można:

- dostępność,
- cena,
- optymalne rozmieszczenie na dachu,
- rozmiar i masę.

Na podstawie przedstawionych kryteriów wstępnie wybrane zostały dwa panele: JA SOLAR JAM60S20 390/MR oraz Longi LR4-60HPH 375M, składające się ze 120 półogniw wykonanych w technologii mono- PERC. Parametry paneli zestawiono w tabeli 1 [13, 20, 22]. Ponieważ oba panele zostały wykonane w tej samej technologii parametry obu paneli są na bardzo zbliżonym poziomie. Istotną różnicą jest moc maksymalna. Generator złożony z 24 szt. paneli JAM6020 zapewniają wymaganą moc szczytową (9360 Wp przy 24 panelach). Panele zostały podzielone na dwa stringi (9 szt. po lewej stronie okna dachowego i 15 szt. po prawej stronie).

Tabela 1. Porównanie parametrów paneli.

	JAM60S20 390/MR	LR4-60HPH 375M
Moc maksymalna PMPP (STC) [Wp]	390	375
Moc maksymalna PMPP (NOCT) [Wp]	295	288
Napięcie jałowe VOC (STC) [V]	41,9	41,14
Napięcie jałowe VOC (NOCT) [V]	39,6	38,4
Prąd zwarcioowy ISC (STC) [A]	11,6	11,6
Prąd zwarcioowy ISC (NOCT) [A]	9,4	9,4
Sprawność η_p [%]	21,0	20,6
Wsp. temperaturowy napięcia a_u [%/°C]	-0,272	-0,270
Wsp. temperaturowy prądu a_i [%/°C]	0,044	0,048
Wsp. temperaturowy mocy a_p [%/°C]	-0,350	-0,350
Temperatura NOCT TNOCT [°C]	45±2	45±2
Maks. obciążenie statyczne - przód [Pa]	5400	5400
Maks. obciążenie statyczne - tył [Pa]	2400	2400
Temperatura pracy [°C]	-40 ÷ 85	-40 ÷ 85
Długość h_p [cm]	177	176
Szerokość w_p [cm]	105	104

Do przetwarzania wytworzonej przez panele energii na prąd przemienny, zgodny ze standardami sieciowymi, zastosowano inwerter Huawei SUN2000-8KTL-M1. Inwerter ma możliwość przyłączenia dwóch łańcuchów paneli. Istotnymi cechami wybranego inwertera jest możliwość współpracy z bankiem energii (wybierając tę funkcję zapewniono możliwość przyszłej rozbudowy systemu), konwekcją naturalną (wysoka niezawodność), przyjazne oprogramowanie umożliwiające podgląd podstawowych parametrów na smartfonie, zabezpieczenie przed pracą wyspową, zabezpieczenie przed odwrotną polaryzacją DC, kontrola stanu izolacji, monitoring prądów różnicowych, zabezpieczenia przeciwprzepięciowe i przetężeniowe.

3. ANALIZA STATYSTYCZNA PRODUKCJI ENERGII

Celem przeprowadzonych analiz statystycznych było określenie czynników, które wpływają na wielkość produkcji energii elektrycznej. Szczegółowej analizie zostały poddane dane produkcji energii elektrycznej w okresie od 2 kwietnia do 31 sierpnia. Nominalna moc produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny wynosiła 9,36 kWp.

Tabela 2. Dane statystyczne szeregu czasowego produkcji energii elektrycznej.

	Kwiecień	Maj	Czerwiec	Lipiec
Wartość maksymalna [kWh]	57,93	56,71	56,84	54,91
Wartość minimalna [kWh]	8,38	11,20	9,06	10,54
Rozstęp [kWh]	49,55	45,51	47,78	44,37
Wartość średnia	32,71	40,93	42,68	39,61
Odchylenie Standardowe	15,85	12,57	13,54	13,56
Mediana	32,90	43,14	48,41	43,17
Współczynnik zmienności [%]	48	31	32	34
Wariancja	251,42	158,24	183,36	183,97
Skośność	0,02	-0,88	-0,78	-0,81
Kurtoza	-1,21	0,34	-0,44	-0,48

Poniżej przedstawione są przykładowe obliczenia dla danych z tabeli dla miesiąca kwietnia 2022.

a) rozstęp – miara zmienności inaczej zwana obszarem zmienności [5]:

$$R = X_{\max} - X_{\min} = 57,93 - 8,38 = 49,55 \text{ kWh}$$

b) odchylenie standardowe:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}}{N} = \frac{\sqrt{(8,97 - 32,71)^2}}{29} = 15,85632$$

gdzie μ – średnia z populacji, N – liczba próbek, X_i – obserwacja w populacji.

d) mediana – wartość środkowa bądź przeciętna, czyli taka która dzieli liczbę obserwacji na pół:

$$me = \frac{X_{N+1}}{2} = 32,90$$

e) współczynnik zmienności – miara zróżnicowania cechy. Współczynnik ten pozwala na ocenę siły zróżnicowania danej zbiorowości statystycznej wykazując siłę zmiennej:

$$V = \frac{\sigma}{M} \cdot 100\% = 48\%$$

gdzie M – średnia.

f) wariancja – informuje o tym jak duże jest zróżnicowanie wyników w danym zbiorze a poszczególnymi wynikami pomiaru:

$$SD^2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{N - 1} = \frac{\sqrt{(8,97 - 32,71)^2}}{29 - 1} = 251,423$$

g) skośność – określa czy w danym zbiorze obserwacji wyniki są mniejsze czy większe niż średnia:

$$SKE = \frac{N \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(N - 1)(N - 2)\sigma^3} = \frac{29(8,97 - 32,71)^3}{(29 - 1)(29 - 2)(15,85632)^3} = 0,018047$$

h) kurtoza [18] – jest to względna miara koncentracji i spłaszczenia rozkładu. Określa ono rozmieszczenie oraz koncentrację wartości w pobliżu średniej:

$$K = \frac{m_4}{\sigma^4} = 1,21741$$

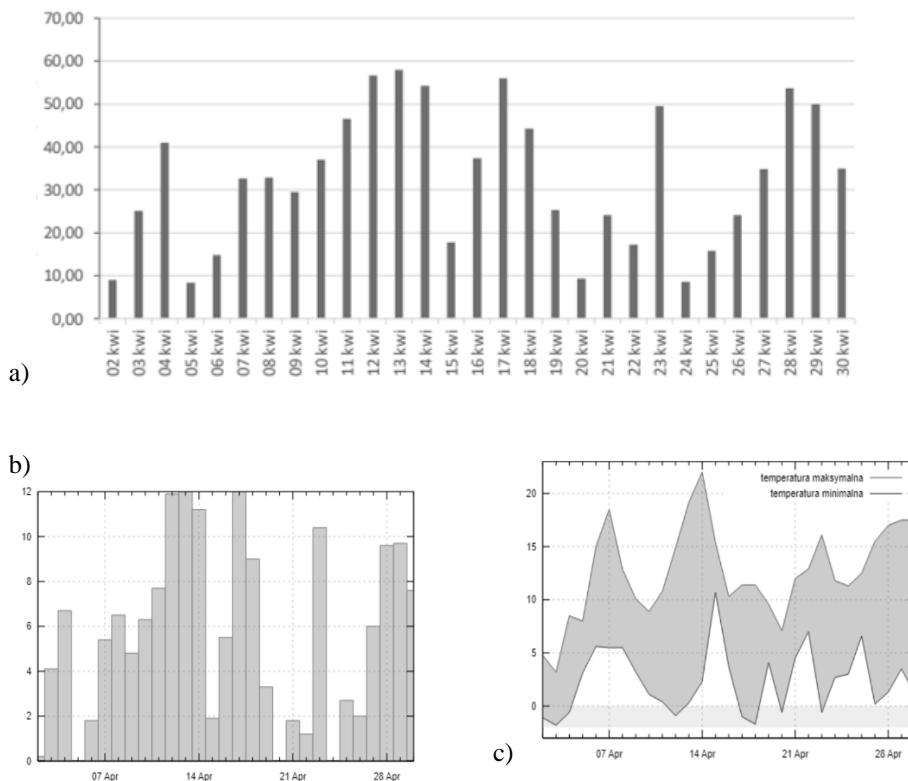
gdzie m_4 – moment centralny rzędu czwartego a σ – odchylenie standardowe.

Miara statystyczna kurtoza [4, 10] – (miara spłaszczania rozkładu szeregu czasowego, dla rozkładu normalnego wynosi 0) ma w większości wartości ujemne co znaczy że rozkład jest mniej wysmukły niż normalny (rozkład platykurtyczny), większe spłaszczenie rozkładu Współczynnik skośności (przyjmujący wartość 0 dla rozkładu normalnego) jest w większości ujemny czyli występuje rozkład o lewostronnej asymetrii rozkładu (występuje więc więcej wartości mniejszych

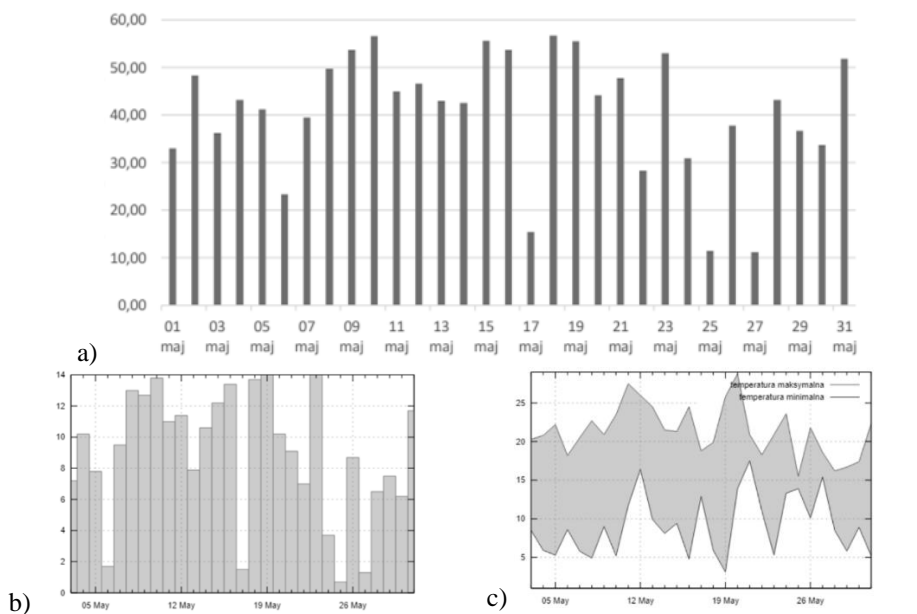
niż wartość średnia) Współczynnik skośności przyjmuje wartości na ogół z przedziału od -2 do +25. Znak współczynnika informuje nas o kierunku asymetrii, wartość o bezwzględna o sile, którą można określić następująco:

- $|0,0-0,4|$ – asymetria rozkładu bardzo słaba,
- $|0,4-0,8|$ – asymetria rozkładu słaba,
- $|0,8-1,2|$ – asymetria rozkładu umiarkowana,
- $|1,2-1,6|$ – asymetria rozkładu silna,
- *więcej niż 1,6* – asymetria rozkładu bardzo silna.

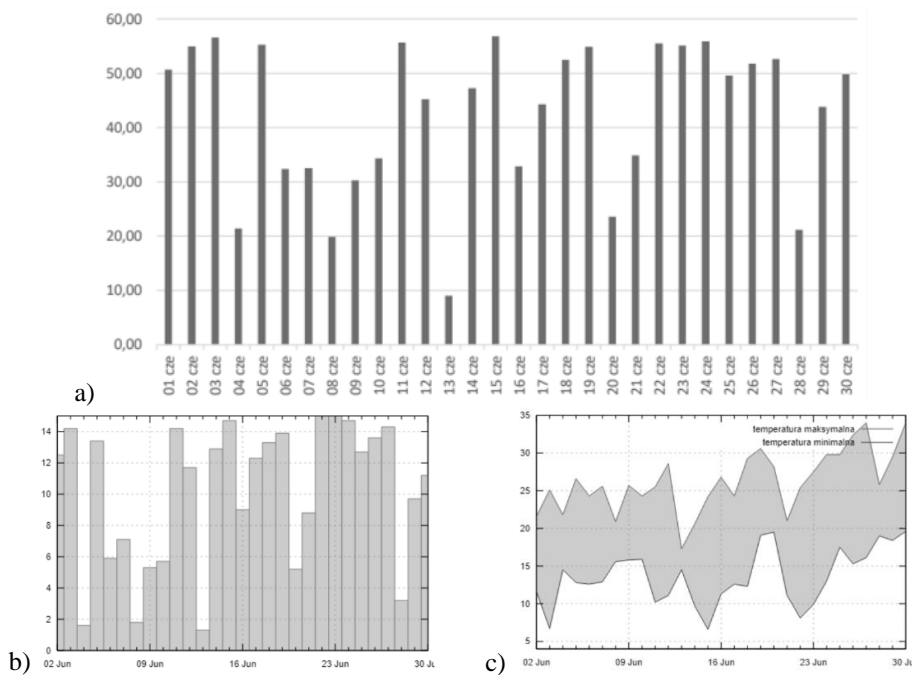
Można zauważyć że asymetria wyników różni się w poszczególnych miesiącach. Dla kwietnia jest to asymetria bardzo słaba, natomiast w następnych miesiącach asymetria ta zmienia się na umiarkowaną. Rys. 4-7 przedstawiają produkcję energii elektrycznej, nasłonecznienia oraz temperatury [12] w miesiącach: kwiecień, maj, czerwiec oraz lipiec 2022.



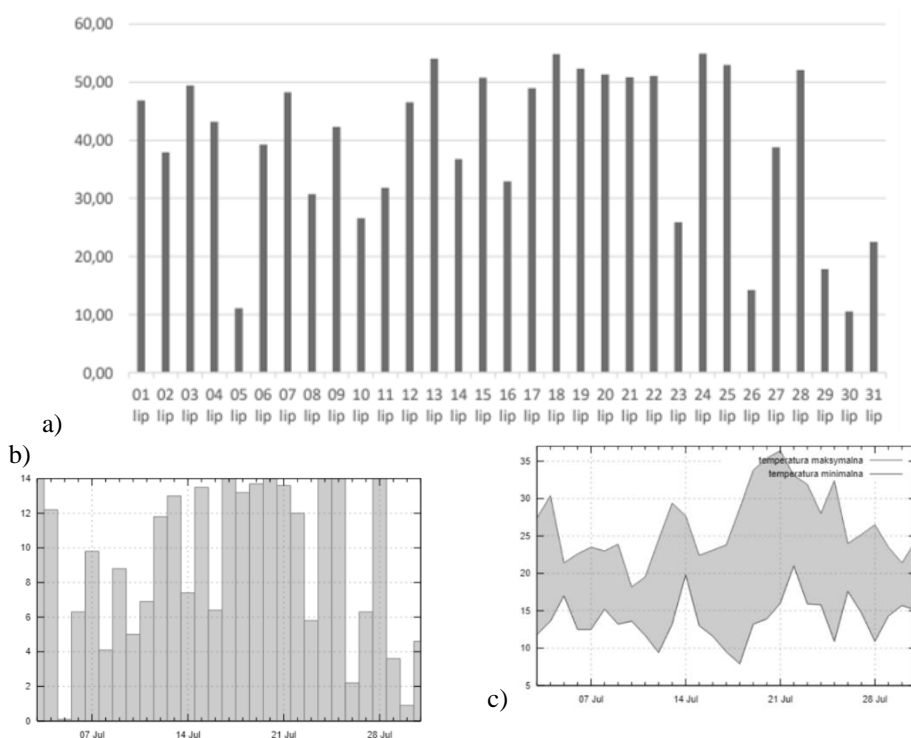
Rys. 3. a) Produkcja energii elektrycznej podana w kWh w kwietniu, b) dzienne nasłonecznienie podane w godzinach w kwietniu , c) rozkład temperatury w kwietniu 2022



Rys. 4. a) Produkcja energii elektrycznej w kWh w maju, b) dzienne nasłonecznienie podane w godzinach w maju, c) rozkład temperatury w maju 2022



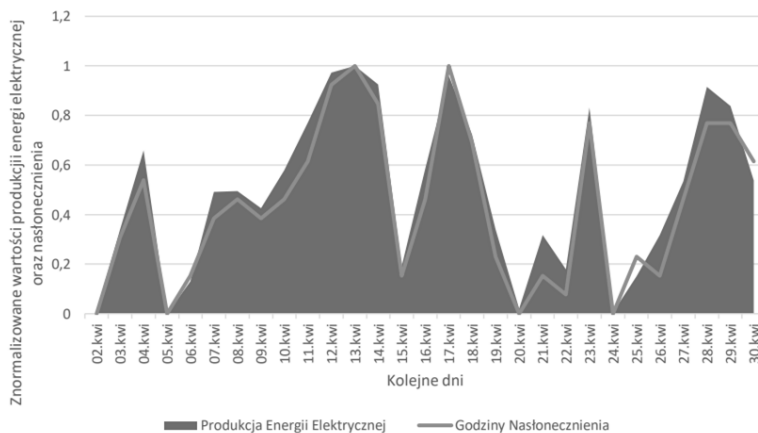
Rys. 6. a) Produkcja energii elektrycznej w kWh w czerwcu, b) dzienne nasłonecznienie podane w godzinach w czerwcu, c) rozkład temperatury w czerwcu 2022



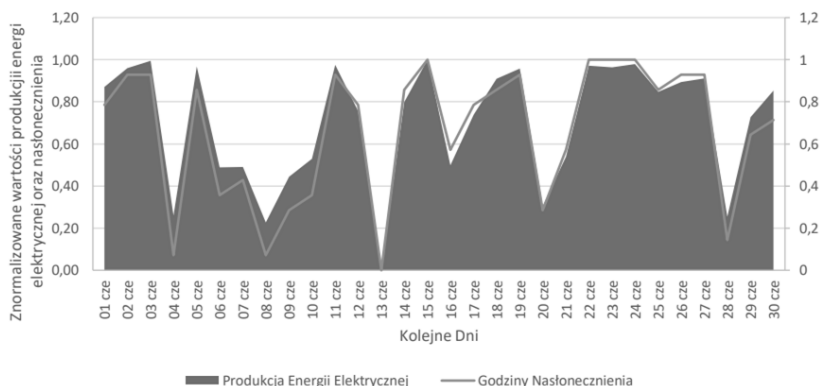
Rys. 7. a) Produkcja energii elektrycznej w kWh w lipcu, b) dzienne nasłonecznienie podane w godzinach w lipcu, c) rozkład temperatury w lipcu 2022

Na wykresach można zauważyć że produkcja energii elektrycznej może mieć dosyć duże odchylenia. Jest to spowodowane zmiennymi warunkami atmosferycznymi takimi jak: nasłonecznienie, prędkość wiatru, temperatura. Produkcja energii słonecznej jest bardzo uzależniona od nasłonecznienia i temperatury w danym dniu co przedstawiają wykresy 3-7. Dla niskich temperatur maksymalnych produkcja energii w danym dniu jest większa niż dla temperatur wysokich, dlatego też okresie wiosennym produkcja będzie większa niż w okresie letnim oraz zimowym ze względu na mniejszą liczbę godzin słonecznych. Dla powyższych danych został wykonany test Szarpio-Wilka [16], który wykazał że szereg czasowy nie ma rozkładu normalnego (nie zostało spełnione założenie stosowania liniowego modelu prognostycznego). Test ten jest uznawany za najlepszy do sprawdzenia normalności rozkładu zmiennej losowej.

Obliczono współczynniki korelacji dla kolejnych miesięcy, co obrazuje tabela poniżej oraz wykonano wykresy pokazując korelację pomiędzy produkcją energii elektrycznej oraz nasłonecznieniem.



Rys. 8. Korelacja pomiędzy produkcją energii elektrycznej a nasłonecznieniem w kwietniu 2022



Rys. 9. Korelacja pomiędzy produkcją energii elektrycznej a nasłonecznieniem w czerwcu 2022

Analizując powyższe rysunki można zauważyć iż produkcja energii elektrycznej dla danego poziomu nasłonecznienia jest praktycznie identyczna. Daje to informację, że wiedza o nasłonecznieniu jest bardzo ważnym elementem do szacowania produkcji energii elektrycznej.

4. PODSUMOWANIE

Analizując wszystkie powyższe zmienne oraz wyniki obliczeń można dojść do kilku wniosków. Pierwszym z nich jest, że istnieje zależność pomiędzy produkcją energii słonecznej a nasłonecznieniem i temperaturą. Z uwagi na brak rozkładu normalnego w analizowanym przypadku, nie można użyć modeli liniowych regresji wielorakiej gdyż nie będą one wystarczająco dokładne. Z rysunków oraz danych można zauważyć iż w miesiącach letnich produkcja oscyluje w bardziej

zbliżonym poziomie co sugeruje współczynnik zmienności który jest na poziomie przeciętnym ($<25\% < x < 45\%$). Pozwala to na dokładniejszą prognozę w miesiącach letnich niż w miesiącach zimowych gdzie współczynnik ten wynosił 48%, co klasyfikuje go jako silną zmienność już. Również można zauważyć że zmienna jaką jest wariancja nie różni się w dużym stopniu od siebie w miesiącach letnich, co może potwierdzić nasze poprzednie stwierdzenie. Wariancja w miesiącach letnich wynosi ona kolejno ok. 158, 183 oraz 183, natomiast w miesiącu zimowym wynosi ona już 251. Widać zatem o wiele większa różnice porównując dane miesiące. Porównując skośności w danych miesiącach można zauważyć iż tylko w kwietniu skośność była dodatnia co przekłada się na rozkład prawostronnie skośny. Oznacza to iż obserwacje w tym miesiącu były w większości poniżej średniej, co pozwala na zauważenie iż w tym miesiącu produkcja energii była niższa niż w innych miesiącach. Natomiast w pozostałych miesiącach skośność była ujemna co za tym idzie rozkład był lewostronnie skośny, co przekłada się na obserwowane wartości które były wyższe niż średnia. Analizując również dane temperaturowe można zauważyć iż w dniach w których temperatura była niższa odnotowano większą produkcję energii, przy zbliżonym nasłonecznieniu.

LITERATURA

- [1] Darłus, G. i Gomółka, Z. (brak daty). Prognozowanie produkcji energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych.
- [2] Dusiło, M. (2022). Transformacja energetyczna w Polsce. Forum Energii.
- [3] Frodyma, K. (2015). Rynek energii ze źródeł odnawialnych w Unii Europejskiej - analiza statystyczna. Zeszyty Naukowe Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie 5(941).
- [4] Frodyma, K. (brak daty). Statystyczna analiza nośników energii ze źródeł odnawialnych w Polsce i wybranych krajach Unii Europejskiej.
- [5] Michalski, T. (2008). Statystyka. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
- [6] Pabis, J., Szpryngiel, M. i Laskowski, J. (2015). Inżynieria konwersji energii ze źródeł odnawialnych "OZE". Wałbrzych-Lublin: Wyższa Szkoła Zarządzania i Przedsiębiorczości.
- [7] Piotrowski, P. (2013). Prognozowanie w elektroenergetyce w różnych horyzontach czasowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej „Elektryka”.
- [8] Piotrowski, P. (2014). Analiza statystyczna danych do prognozowania ultrakrótkoterminowego produkcji energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych. Przegląd Elektrotechniczny R 90 nr 4/2014.
- [9] Wasilewski, J. i Baczyński, D. (2011, Październik). Krótkoterminowe Prognozowanie Produkcji Energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych. Rynek Energii 96 nr 5.
- [10] Wiktorowicz, J., Grzelak, M. i Grzeszkiewicz-Radulska, K. (2020). Analiza Statystyczna z IBM SPSS Statistics. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.

- [11] Wilusz-Rybak, E. (2019, Czerwiec). Struktura wytwarzania energii z systemów fotowoltaicznych. Gaz, Woda i Technika Sanitarna.
- [12] <https://www.weatheronline.pl>, 17.08.2022 r.
- [13] <https://www.elektro.info.pl/artykul/rynek-energii/168569>, 16.08.2022 r.
- [14] <https://pl.weatherspark.com>, 17.08.2022 r.
- [15] <https://www.cire.pl/artykuly/opinie/>, 28.08.2022 r.
- [16] <https://www.statystyka.az.pl/centrum-statystyki/test-normalnosci-shapiro-wilka.php>, 16.08.2022 r.
- [17] <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-oze-w-polsce>, 28.08.2022 r.
- [18] <https://cyrkiel.info/statystyka/kurtoza/>, 20.08.2022 r.
- [19] <https://geoportal-krajowy.pl>, 16.08.2022 r.
- [20] <https://globalsolaratlas.info>, 16.08.2022 r.
- [21] <https://eon.pl/dla-domu/>, 16.08.2022 r.
- [22] <https://stiloenergy.pl/>, 16.08.2022 r.

STATISTICAL ANALYSIS OF DATA FOR FORECASTING ELECTRICITY PRODUCTION IN A SELECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM

The paper presents the results of the analysis of data provided in the process of energy production by a photovoltaic system, which were used to forecast electricity production. The work undertook to determine the factors affecting the volume of energy production. For this purpose, a photovoltaic installation operating from April to July 2022 will be used.

(Received: 28.10.2022, revised: 17.11.2022)