

---

**ANNALS OF THE POLISH ASSOCIATION  
OF AGRICULTURAL AND AGRIBUSINESS ECONOMISTS**

ROCZNIKI NAUKOWE  
STOWARZYSZENIA EKONOMISTÓW ROLNICTWA I AGROBIZNESU

---

Received: 03.11.2023  
Acceptance: 04.12.2023  
Published: 06.12.2023  
JEL codes: Q42, Q47

Annals PAAAE • 2023 • Vol. XXV • No. (4)

License: Attribution 3.0 Unported (CC BY 3.0)

DOI: 10.5604/01.3001.0054.0878

**PIOTR GRADZIUK\*<sup>1</sup>, ANNA TROCEWICZ\*\***

\*Instytut Rozwoju Wsi i Rolnictwa PAN, \*\*Akademia Bialska im Jana Pawła II, Polska

**EKONOMICZNA EFEKTYWNOŚĆ ZASTOSOWANIA  
MAGAZYNU ENERGII W PROSUMENCKIEJ INSTALACJI  
FOTOWOLTAICZNEJ**

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, prosumencka instalacja fotowoltaiczna, magazyn energii, uśrednione koszty wytworzenia energii elektrycznej, gospodarstwo rolne, NPV, DPBT

**ABSTRAKT.** Celem artykułu jest ocena ekonomicznej efektywności wytwarzania energii elektrycznej w prosumenckiej instalacji fotowoltaicznej wspomaganej magazynem energii, rozliczanej w modelu *net-billingu*. Przedmiotem badań była analiza porównawcza dla dwóch wariantów, tj. 1) odniesienia (tylko instalacja fotowoltaiczna) i 2) hybrydowego (wspomaganego magazynem energii). Do jej oceny posłużono się metodą uśrednionego jednostkowego kosztu wytworzenia energii elektrycznej (LCOE) oraz wartością bieżącą netto (NPV) i dynamicznym okresem zwrotu nakładów (DPBT). Obiektem badań było gospodarstwo rolne specjalizujące się w produkcji mleka, w którym zainstalowano prosumencki system fotowoltaiczny o mocy 19,62 kWp wraz z magazynem energii o pojemności 10 kWh. Z przeprowadzonych badań wynika, że przy obecnie obowiązującym systemie rozliczeń jednostkowy koszt wytworzenia energii elektrycznej w wariantcie odniesienia był o ponad 40% niższy od tak obliczonej wartości dla instalacji fotowoltaicznej wyposażonej w magazyn energii. Przeprowadzona symulacja dla taryf dynamicznych, które będą obowiązywać od 1 lipca 2024 roku, wykazała, że zastosowanie magazynu energii może korzystnie wpłynąć na efektywność ekonomiczną instalacji fotowoltaicznych, ale wymaga to zainstalowania inteligentnego systemu zarządzania bilansem energii.

---

<sup>1</sup> Corresponding author: pgradziuk@irwirpan.waw.pl

## WSTĘP

Za jeden z przyszłościowych kierunków wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) uznaje się wytwarzanie energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych. Wynika to stąd, że wszystkie źródła energii (z wyjątkiem energii przyływów i odpływów mórz – 85 EJ/a, które powodowane są oddziaływaniem grawitacyjnym, głównie Księżyca oraz energii wnętrza ziemi – 672 EJ/a), biorą początek z pochłoniętego promieniowania słonecznego –  $3,93 \times 10^6$  EJ/a [Odum 1996]. Dopływająca do geobiosfery energia słoneczna umożliwia przebieg procesów hydrologicznych, biologicznych, chemicznych i fizycznych, w wyniku których przetwarzana jest na energię cieplną, wodną, wiatrową i biomasę. Również kopalne paliwa węglowodorowe są wynikiem oddziaływania słońca, ponieważ powstały z powolnej przemiany biomasy [Smil 1994]. Ilość energii docierająca do Ziemi w ciągu roku aż tysiąckrotnie przewyższa światowe zapotrzebowanie energetyczne [Ney 1994].

Energia promieniowania słonecznego jest jednak rozproszona, trudna do bezpośredniego, wydajnego zastosowania w praktyce, ale metody jej transformacji są wciąż udoskonalane. Pogląd ten między innymi wyrazili w swoich rozważaniach Augustyn Woś i Józef Zegar [2002], jednocześnie konstatując, że czas pracuje na rzecz odnawialnych zasobów, a proces ten na razie powolny, zostanie przyspieszony przez rozwój nowych technologii [Gołębiewski, Rakowska 2017, Ślusarz i in. 2021]. W przypadku ogniw fotowoltaicznych średnia sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną w latach 1980-2021 wzrosła z 9,0% do 21,1% [Chatzipanagi i in. 2022]. W wyniku prowadzonych prac badawczo-rozwojowych od 2010 roku nastąpiła też znacząca obniżka cen modułów fotowoltaicznych [Feldman i in. 2015, Gradziuk i in. 2018, Lugo-Laguna i in. 2021, Renné 2022]. Z analiz opublikowanych przez Bloomberg New Energy Finance [BNEF 2020] wynika, że w latach 2010-2020 ich ceny spadły o 89%, z 2,00 USD/W do 0,21 USD/W.

Ze względu na znaczący postęp technologiczny w branży OZE, którego skutkiem są coraz niższe koszty urządzeń i wyższa efektywność energetyczna, wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem energii słonecznej. Z obserwacji tempa rozwoju tego sektora wynika, że jest ono znacznie szybsze niż założone w prognozach „Polityki energetycznej Polski do 2040 roku” (PEP 2040) [MKiŚ 2021a]. Z szacunków sporządzonych na podstawie raportu „Rynek fotowoltaiki w Polsce 2022” [IEO 2022] i przy założeniu, że wydajność paneli fotowoltaicznych będzie na takim samym poziomie jak w latach 2018-2020, wynika, że w 2022 roku ilość wytworzonej energii elektrycznej przez ten sektor wyniesie tyle, ile zaprogramowano na 2025 rok. Tak dynamiczny rozwój całego sektora OZE nie byłby jednak możliwy bez przeznaczania na ten cel publicznych środków finansowych. Środki te były przede wszystkim alokowane w ramach programu operacyjnego „Infrastruktura i Środowisko” (POIiŚ), regionalnych programów operacyjnych (RPO), Programu Rozwoju

Obszarów Wiejskich (PROW), a także narodowego oraz wojewódzkich funduszy ochrony środowiska i gospodarki wodnej (NFOŚGW i WFOŚGW) [Gradziuk 2017a,b].

Według stanu na 31 grudnia 2021 roku zainstalowana moc elektryczna w źródłach fotowoltaicznych wyniosła 7637,70 MW, w tym u prosumentów 5836,60 MW. Jeszcze w 2018 roku wartości te były wielokrotnie niższe i wynosiły odpowiednio: 565,56 MW i 275,54 MW. W tym samym okresie wzrosła liczba prosumentów, z 51 016 do 845 730. Tak znaczący rozwój fotowoltaiki w latach 2018-2021 przyczynił się do bezprecedensowego wzrostu udziału energii elektrycznej z tego źródła do jej produkcji ogółem z 0,18% do 2,19% [ARE 2022].

Na tej podstawie można wnosić, że spełniła się wizja, o której pisał Ryszard Manteuffel [1987]: „Surowiec, z którego przemysł dzisiaj sięga pełną garścią, stanowi dobro ograniczone, a wszystkie liczące się dzisiaj źródła energii dotyczą energii nieodtwarzalnej. I to jest zma, która będzie trapić ludzkość tak długo, aż geniusz ludzki wynajdzie sposób korzystania bez ograniczeń z energii słonecznej”. Jednak ten rodzaj energii wymaga utrzymywania tzw. „gorącej rezerwy” (zapasu mocy dyspozycyjnej jednostek wytwórczych pozostających w ruchu wynikający z chwilowego niedociążenia kotłów turbozespołów), tak jak i w przypadku energetyki wiatrowej [Żylicz 2012], ponieważ jej wytwarzanie podlega wahaniom zarówno w skali krótkoterminowej (od sekund do godzin), jak i długoterminowej [Child i in. 2018]. Alternatywą przy tak znaczącym wzroście rangi tego sektora jest rozbudowa magazynów energii [Softysik i in. 2021, 2022], które w ustawie Prawo energetyczne (art. 3, pkt 10k) [Dz.U. 2022, poz. 1385] zostały zdefiniowane, jako instalacje umożliwiające magazynowanie energii elektrycznej i wprowadzenie jej do sieci elektroenergetycznej. Bardzo ważnym obszarem ich zastosowania są lokalne sieci dystrybucyjne niskiego napięcia ze znaczącym udziałem prosumentów. Wynika to stąd, że w okresach wytwarzania energii mogą następować przekroczenia napięcia w sieciach przesyłowych i może wystąpić konieczność czasowych wyłączeń instalacji prosumenckich [Bukowski i in. 2022]. Problemy te są szczególnie dotkliwe na obszarach wiejskich, z powodu niewystarczająco rozwiniętej infrastruktury energetycznej [Komorowski 2018]. Ponadto zastosowanie magazynu energii, przy obowiązującym od 1 kwietnia 2022 roku systemie odrębnego rozliczania energii elektrycznej wprowadzonej i pobranej z sieci elektroenergetycznej (ang. *net-billing*) przez prosumentów, może korzystnie oddziaływać na ekonomiczną efektywność instalacji fotowoltaicznej. Od 1 lipca 2024 roku różnice te będą znacznie wyższe, ponieważ w ramach *net-billingu* zastosowane zostaną taryfy dynamiczne według cen godzinowych [Dz.U. 2023, poz. 2131].

Celem artykułu jest ocena porównawcza ekonomicznej efektywności wytwarzania energii elektrycznej w prosumenckiej instalacji fotowoltaicznej wspomaganej magazynem energii. Przeprowadzono ją dla dwóch wariantów, tj. 1) odniesienia (tylko instalacja fotowoltaiczna) i 2) hybrydowego (wspomagane magazynem energii).

## MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badania stanowiły kontynuację wieloletnich analiz prowadzonych od 1994 roku, początkowo w Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie, a następnie kontynuowanych w Instytucie Rozwoju Wsi i Rolnictwa Polskiej Akademii Nauk i Akademii Białskiej im. Jana Pawła II, które były skoncentrowane na możliwościach i efektywności wykorzystania OZE, w tym także energii słonecznej [Gradziuk 2016a,b, 2019, Gradziuk i in. 2018].

Do oceny efektywności ekonomicznej badanej instalacji posłużono się metodą uśrednionego jednostkowego kosztu wytworzenia energii elektrycznej (ang. *levelized costs of electricity* – LCOE) [Mikołajuk i in 2016, Sandvall i in. 2017]. Wyniki obliczeń tą metodą pozwalają na porównywanie kosztów produkcji energii z różnych źródeł, zarówno tych odnawialnych, jak i konwencjonalnych, w tym energii z sieci elektroenergetycznej. Korzystając z formuły (1) ustalono uśrednione koszty wytworzenia 1 MWh energii elektrycznej dla całego okresu eksploatacji.

$$\frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n E_{et}} \quad (1)$$

gdzie:

$LCOE$  – uśrednione koszty wytworzenia energii elektrycznej [zł/MWh],

$I_t$  – nakłady inwestycyjne w roku  $t$  (amortyzacja i koszt kapitału) [zł],

$M_t$  – pozostałe koszty w roku  $t$  [zł],

$E_{et}$  – ilość energii elektrycznej wytworzona w roku  $t$  [MWh],

$r$  – uśredniona stopa dyskonta [%],

$n$  – planowany okres eksploatacji systemu fotowoltaicznego [lata].

Do oceny efektywności tego projektu inwestycyjnego wykorzystano także wskaźniki: wartości bieżąca netto NPV (ang. *net present value*) oraz dynamiczny (zdyskontowany) czas zwrotu nakładów DPBT (ang. *dynamic pay back time*).

Na realizację inwestycji uzyskano znaczące wsparcie finansowe, dlatego w badaniach przeprowadzono symulację efektywności takiego systemu również dla rzeczywiście poniesionych kosztów. Dane empiryczne uzyskano od właściciela gospodarstwa rolnego z gminy Miączyn, powiat zamojski, województwo lubelskie, w którym zlokalizowana jest badana instalacja. Na ich podstawie ustalono całkowite koszty inwestycyjne, źródła finansowania oraz przychody i koszty jej funkcjonowania. Z uwagi na to, że przewidywany okres eksploatacji badanej inwestycji wynosi 25 lat, przeprowadzenie rzetelnej analizy wymagało przyjęcia założeń dotyczących przychodów i kosztów w przyszłym okresie (2024-2047).

Przy ich ustalaniu wykorzystano dane historyczne z pierwszego roku eksploatacji, zdobyte doświadczenia, obserwacje rolnika, prognozy rynkowe cen energii elektrycznej, a także literaturę przedmiotu. Na tej podstawie przyjęto następujące założenia:

- spadek mocy modułów fotowoltaicznych – 0,5%/rok, począwszy od 2024 roku; poziomem odniesienia był średnioroczny wolumen wytworzonej energii elektrycznej w 2023 roku (16,578 MWh),
- koszty eksploatacyjne – 3 %/rok; poziomem odniesienia były nakłady inwestycyjne,
- ceny energii odprowadzonej do sieci (depozyt), tj. średnie ceny rynkowe z poprzedniego miesiąca kalendarzowego publikowane przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

### CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Gospodarstwo rolne, w którym prowadzono badania specjalizuje się w chowie bydła mlecznego. Według stanu na 31 października 2023 roku, produkcja roślinna prowadzona była na powierzchni ponad 50 ha użytków rolnych, w tym około 7 ha to grunty dzierżawione, a pogłowie bydła wynosiło 21 krów mlecznych, 12 jałówek i 26 cieląt (40,7 DJP – dużych jednostek przeliczeniowych). Z uwagi na specyfikę prowadzonej produkcji (udój mechaniczny, schładzarka do mleka, zmechanizowany system zadawania pasz i usuwania obornika) w gospodarstwie rocznie zużywano ponad 15 MWh energii elektrycznej. W 2022 roku zużycie to wyniosło 16,384 MWh, a koszty zakupu energii elektrycznej 11 173,09 zł, dlatego właściciel gospodarstwa podjął decyzję o instalacji prosumenckiego systemu fotowoltaicznego o mocy 19,62 kWp, wraz z magazynem energii o pojemności 10 kWh. Szczegółowy wykaz elementów instalacji wraz kosztami zawarto w tabeli 1. Panele fotowoltaiczne zainstalowano na stalowej konstrukcji, białej w grunt na głębokość 1,30 m, bez użycia betonowych fundamentów. Konstrukcja jest rozmieszczona tak, aby rzędy modułów nie doprowadzały do zacielenia sąsiadujących modułów. Panele słoneczne są nachylone pod kątem 35° względem poziomu. Magazyn energii zamontowano w zlokalizowanym obok instalacji fotowoltaicznej budynku gospodarczym, pełniącym funkcje garażowe.

Dodatkową zachętą była możliwość uzyskania dofinansowania z PROW 2014-2020 w ramach poddziałania 4.1.3. „Modernizacja gospodarstw rolnych – w obszarze zielona energia w gospodarstwie”, z której skorzystano. Wartość dofinansowania wyniosła 75,6 tys. zł, tj. 60% całkowitych kosztów inwestycyjnych netto. Wytwarzana energia w pierwszej kolejności wykorzystywana jest do zasilania urządzeń znajdujących się w obiektach należących do gospodarstwa, a nadwyżki odprowadzane są do depozytu prosumenckiego u operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) na zasadzie *net-billingu*. System *net-billingu* zakłada odrębne rozliczenie wartości energii elektrycznej wprowadzonej do

Tabela 1. Koszty inwestycyjne prosumenckiej instalacji fotowoltaicznej z magazynem energii

Wyszczególnienie	Liczba	Wartość netto [PLN]
1. System fotowoltaiczny, w tym:	1 komplet	63 890
– moduł fotowoltaiczny JINKO 545W, JKM545M-72HL4-V wraz z dostawą i montażem	1 komplet (36 szt.)	32 040
– inwerter fotowoltaiczny o mocy 10 kW Huawei Sun2000-10KTL-M1 wraz z dostawą i montażem	1 komplet (2 szt.)	14 100
– rozdzielnica AC oraz rozdzielnica DC z osprzętem, wraz z dostawą i montażem	1 komplet	7 700
– pozostały osprzęt systemu fotowoltaicznego	1 komplet	10 050
2. Konstrukcje montażowe wraz z dostawą i montażem	1 komplet	13 800
3. Okablowanie	1 komplet	7 300
4. Magazyn energii, Luna 2000 10 kWh	1 komplet	31 200
5. Transport, montaż i uruchomienie	1 usługa	9 810
6. Koszty ogółem	–	126 000

Źródło: opracowanie własne na podstawie wniosku o dofinansowanie inwestycji z Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich 2014-2020 w ramach poddziałania 4.1.3. „Modernizacja gospodarstw rolnych – w obszarze zielona energia w gospodarstwie”

sieci elektroenergetycznej i energii elektrycznej pobranej z sieci elektroenergetycznej [MKiŚ 2021b]. Nadwyżki energii znajdujące się w depozycie konsumenckim powinny być rozliczane w ciągu 12 miesięcy, według średnich cen rynkowych z poprzedniego miesiąca kalendarzowego publikowanych przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

## WYNIKI BADAŃ

Badana instalacja fotowoltaiczna została oddana do eksploatacji w maju 2023 roku. W tabeli 2 zamieszczono dane pochodzące z odczytów liczników od 12 maja do 21 listopada 2023 roku. Dla pozostałych okresów, tj. 01.01-11.05.2023 i 22.11-31.12.2023, wartości te oszacowano na podstawie obserwacji prowadzonych od 1 stycznia 2012 roku do 31 października 2023 roku w Roztoczańskim Centrum Naukowo-Dydaktycznym „Zwierzyniec – Biały Słup” (powiat zamojski), w którym zlokalizowano jedną z pierwszych w Polsce instalacji fotowoltaicznych o zbliżonej mocy (21,16 kWp), oraz średniego zużycia energii elektrycznej w latach 2020-2022.

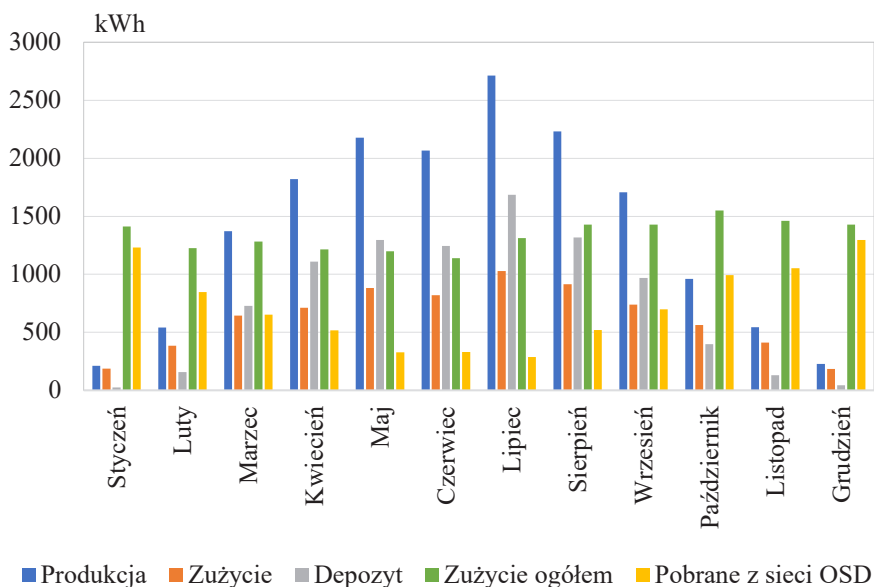
Z zamieszczonych w tabeli 2 danych wynika, że wielkość wytworzonej energii elektrycznej przez zainstalowany system fotowoltaiczny była o ponad 3% wyższa niż jej zużycie, ale cechowała się wysoką zmiennością zarówno w ciągu doby, jak i miesiąca, szczególnie między listopadem i lutym oraz kwietniem i wrześniem. Na rysunku 1 zilustrowano zmienność w układzie miesięcznym charakterystyk zawartych w tabeli 2, dotyczących następujących wartości: produkcji energii w instalacji fotowoltaicznej, sposobów jej rozdysponowania (autokonsumpcja w gospodarstwie i depozyt), a także zużycia ogółem (zarówno pobranej z sieci OSD, jak i wytworzonej w instalacji fotowoltaicznej).

Z zaprezentowanego na rysunku 1 bilansu wynika, że od marca do września ilość wytwarzanej energii elektrycznej była wyższa od jej zużycia, nie mniej jednak z uwagi na znaczące dobowe zróżnicowanie, zachodziła konieczność jej pobierania z sieci OSD.

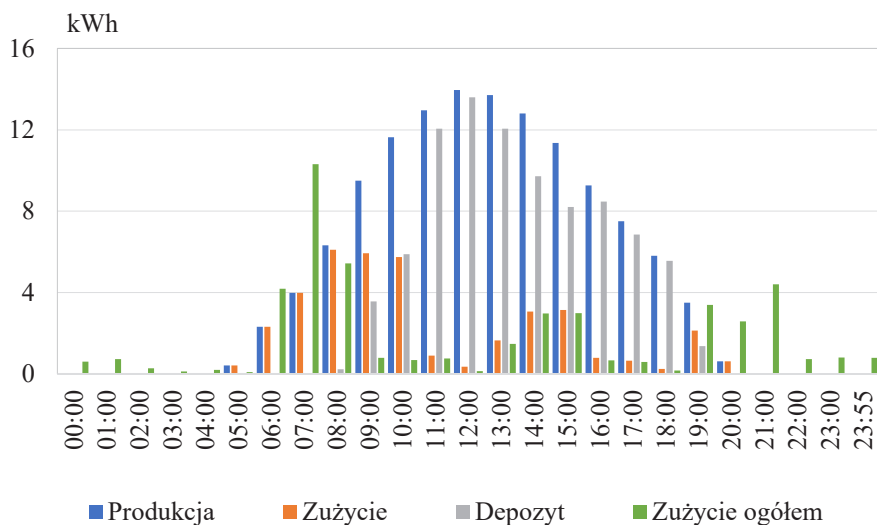
Tabela 2. Podstawowe ilościowe charakterystyki wytworzonej i zużytej energii elektrycznej w badanym gospodarstwie od 1 stycznia do 31 grudnia 2023 roku

Miesiąc	Instalacja PV [kWh]			Zużycie [kWh]			Magazyn [kWh]	
	produkcja	zużycie	depozyt	razem	z PV	z sieci	ładowanie	rozładowanie
Styczeń	212	186	26	1 412	181	1 231	48	43
Luty	542	384	158	1 226	379	847	98	92
Marzec	1 372	643	729	1 283	631	652	262	251
Kwiecień	1 822	712	1 110	1 214	698	516	312	303
Maj	2 178	881	1 297	1 198	869	329	348	338
Czerwiec	2 066	821	1 245	1 140	810	330	324	317
Lipiec	2 712	1 027	1 685	1 311	1 024	287	353	350
Sierpień	2 233	916	1 317	1 429	910	519	334	328
Wrzesień	1 708	739	969	1 428	730	698	299	290
Październik	962	563	399	1 549	555	994	254	246
Listopad	543	412	131	1 462	410	1 052	131	123
Grudzień	228	184	44	1 429	132	1 296	51	44
<b>Razem</b>	<b>16 578</b>	<b>7 466</b>	<b>9 110</b>	<b>16 081</b>	<b>7 329</b>	<b>9 112</b>	<b>2 814</b>	<b>2 725</b>

Źródło: opracowanie własne na podstawie odczytu liczników energii elektrycznej

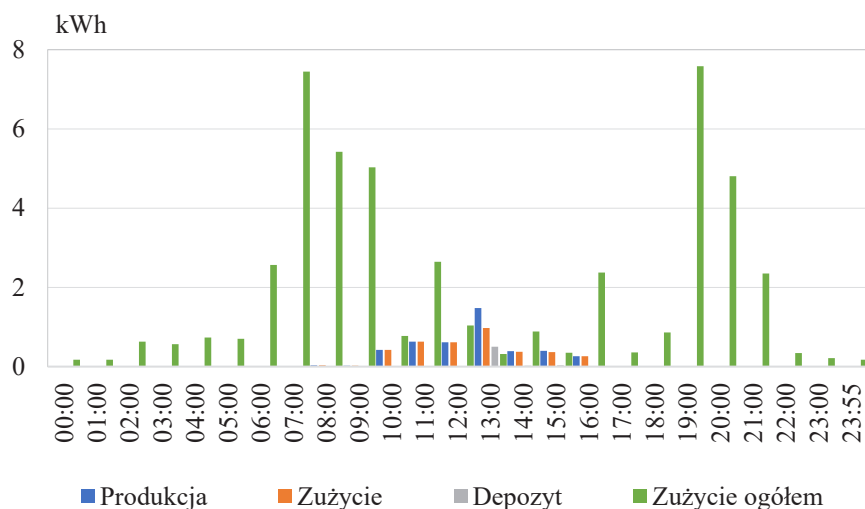


Rysunek 1. Bilans energii elektrycznej wytwarzanej i zużywanej w badanym gospodarstwie  
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 2. Dobowy (5.06.2023) bilans energii elektrycznej wytwarzanej i zużywanej w badanym gospodarstwie  
Źródło: opracowanie własne





Rysunek 3. Dobowy (25.10.2023) bilans energii elektrycznej wytwarzanej i zużywanej w badanym gospodarstwie

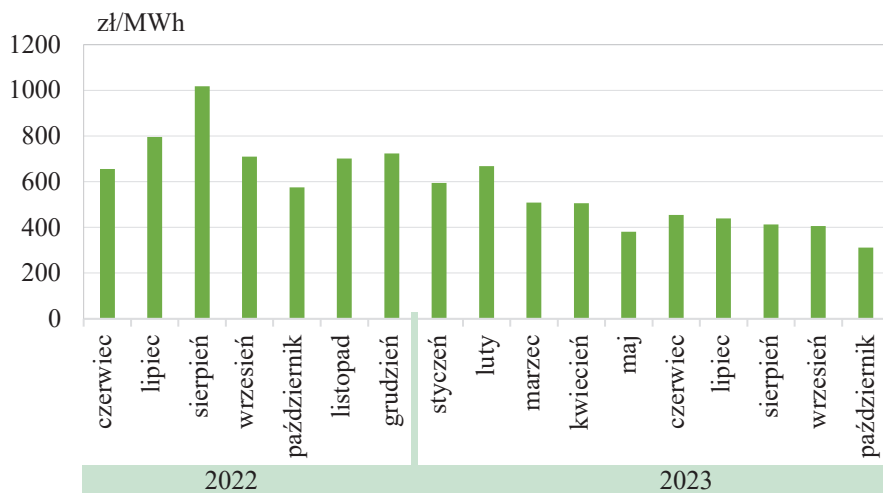
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 2 zilustrowano bilans energii elektrycznej dla doby (5 czerwiec 2023 rok), w której ilość wytworzonej energii elektrycznej (125,6 kWh) była prawie trzykrotnie wyższa od jej zużycia (46,0 kWh), mimo to zachodziła konieczność jej pobrania z sieci OSD (7,9 kWh).

Odmienne taki bilans ukształtował się 25 października 2023 roku, gdy w ciągu doby wytworzono tylko 4,2 kWh energii elektrycznej, a jej zużycie wyniosło 48,5 kWh, w tym 3,7 kWh z instalacji fotowoltaicznej (rysunek 3).

Rachunek uśrednionych kosztów wytworzenia energii elektrycznej, NPV i DPBT przeprowadzono w dwóch podstawowych wariantach, tj. 1) odniesienia (tylko instalacja fotowoltaiczna) i 2) hybrydowm (wspomagany magazynem energii). Dla każdego z tych wariantów przeprowadzono symulacje dla rzeczywiście poniesionych nakładów inwestycyjnych (z dofinansowaniem), jak i bez dofinansowania oraz dwóch stóp dyskonta (4% i 6%). W obliczeniach uwzględniono przychody możliwe do uzyskania z rozliczenia nadwyżek wytworzonej energii elektrycznej i przekazanej do sieci OSD według rynkowej miesięcznej ceny energii elektrycznej (rysunek 4), wyznaczonej dla danego miesiąca kalendarzowego i publikowanej przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (PSE S.A.).

Z przeprowadzonych analiz wynika, że przy obecnie obowiązującym systemie rozliczeń (od 1 kwietnia 2022 roku do 30 czerwca 2024 roku) jednostkowy koszt wytworzenia energii elektrycznej w wariantcie odniesienia było o ponad 40% niższy od tak obliczonej wartości dla instalacji fotowoltaicznej wyposażonej w magazyn energii (tabela 3).



Rysunek 4. RCEm – rynkowe miesięczne ceny energii elektrycznej

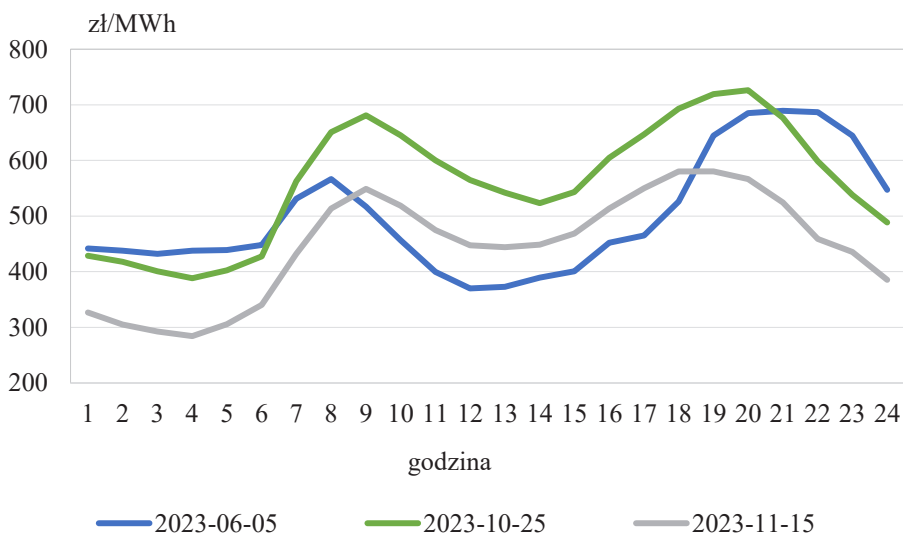
Źródło: [PSE 2023a]

Tabela 3. Uśrednione koszty wytworzenia energii elektrycznej oraz wartości NPV i DPBT

Wyszczególnienie		LCOE [zł/MWh]		NPV [zł]		DPBT [lata]	
		stopa dyskonta					
		4%	6%	4%	6%	4%	6%
Instalacja fotowoltaiczna (wariant odniesienia)	z dofinansowaniem	124	198	76 372	34 884	8	10
	bez dofinansowania	152	234	22 338	6 110	4	6
Instalacja fotowoltaiczna z magazynem energii (wariant hybrydowy)	z dofinansowaniem	212	292	39 784	28 140	11	14
	bez dofinansowania	274	399	-35 816	-47 460	15	19

Źródło: opracowanie własne

Od 1 lipca 2024 roku wartości nadwyżek energii elektrycznej wyprodukowanej przez prosumentów będą rozliczane z zastosowaniem taryf dynamicznych, które zaliczane są do najbardziej złożonych produktów na rynku konsumenckim, ponieważ przenoszą cały ciężar zarządzania ryzykiem na odbiorcę [Marona, Tomczak 2023, MKiŚ 2021b]. W tym systemie energia elektryczna rozliczana będzie według giełdowej ceny godzinowej na rynkach dnia następnego (RDN), a te podlegają dużym wahaniom (rysunek 5).



Rysunek 5. Przykłady rynkowych godzinowych cen energii elektrycznej

Źródło: [PSE 2023b]

Przeprowadzona analiza na podstawie godzinowych cen rynkowych, przedstawionych na rysunku 5, wykazała, że nawet sprzedaż zmagazynowanej energii elektrycznej po maksymalnych cenach nie wpłynie znacząco na poprawę efektywności takiej instalacji.

## PODSUMOWANIE

Jednym z niezbędnych elementów transformacji energetycznej, oprócz rozwoju wykorzystania odnawialnych źródeł energii (z uwagi na ich specyfikę), jest rozbudowa systemu magazynowania energii. Zwiększenie potencjału tych zdolności uzależnione będzie od ekonomicznej efektywności takich inwestycji. Z przeprowadzonej analizy funkcjonowania prosumenckiego systemu fotowoltaicznego o mocy 19,62 kWp, wraz z magazynem energii o pojemności 10 kWh, zlokalizowanym w gospodarstwie rolnym specjalizującym się w produkcji mleka, wynika, że jest ona ekonomicznie efektywna. Uśredniony jednostkowy koszt wytworzenia 1 MWh energii elektrycznej nawet w wariancie z magazynem energii, który okazał się najwyższy (399 zł/MWh) i tak był znacznie niższy od ceny zakupu energii elektrycznej z sieci operatora systemu dystrybucyjnego (682 zł/MWh). Gdyby zrezygnować z magazynu energii, efektywność samej instalacji fotowoltaicznej byłaby o ponad 40% wyższa, a uśredniony koszt jednostkowy wytworzenia energii elektrycznej byłby o około 400 zł/MWh niższy od ceny zakupu

z sieci OSD. Podane wartości obliczono bez uwzględnienia dofinansowania, które uzyskano na realizację tej inwestycji. Powodem niższej ekonomicznej efektywności systemu fotowoltaicznego wyposażonego w magazyn energii jest przede wszystkim bardzo wysoki koszt jego zakupu i montażu (32,5% wartości inwestycji) oraz stosunkowo niska wydajność (zmagazynowano około 17,0% wytworzonej energii). Wprowadzenie taryf dynamicznych, które będą obowiązywać od 1 lipca 2024 roku, może korzystnie wpłynąć na efektywność ekonomiczną systemów fotowoltaicznych, ale wymaga to zainstalowania inteligentnego systemu zarządzania bilansem energii w całym gospodarstwie.

## BIBLIOGRAFIA

- ARE (Agencja Rynku Energii S.A.) 2022. *Statystyka elektroenergetyki polskiej 2021. Rocznik* (Polish electricity statistics 2021. Yearbook.). Warszawa: Agencja Rynku Energii S.A.
- BNEF (Bloomberg New Energy Finance). 2020. *Climatescope emerging markets outlook 2020 Energy transition in the world's fastest growing economies*. BloombergNEF.
- Bukowski Marcin, Janusz Majewski, Agnieszka Sobolewska, Ewa Stawicka, Aneta Suchoń. 2022. *Wybrane ekonomiczne i prawne aspekty wytwarzania energii z instalacji fotowoltaicznych w gospodarstwach rolnych województwa mazowieckiego* (Selected economic and legal aspects of energy production from photovoltaic installations on farms in the Masovian Voivodeship). Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Chatzipanagi Anatoli, Arnulf Jaeger-Waldau, Charles Cleret de Langavant, et al. 2022. *Clean energy technology observatory: Photovoltaics in the European Union. Status report on technology development, trends, value chains and markets – 2022*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: 10.2760/812610, JRC130720.
- Child Michael, Dmitrii Bogdanov, Christian Breyer. 2018. The role of storage technologies for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Energy Procedia* 155: 44-60. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.067.
- Feldman David, Galen Barbose, Robert Margolis, Mark Bolinger, Donald Chung, Run Fu, Joachim Seel, Carolyn Davidson, Ryan Wiser. 2015. *Photovoltaic system pricing trends historical, recent, and near-term projections*. 2015 Edition. SunShot, U.S. Department of Energy.
- Gołębiewski Jarosław, Joanna Rakowska. 2017. Production and use of bioenergy in Poland in the context of the development of bioeconomy. [In] *Rural development 2017: bioeconomy challenges*. Proceedings of the 8th International Scientific Conference 23-24 November, 2017, Aleksandras Stulginskis University, 2017, p. 278-284. DOI: 10.15544/RD.2017.195.
- Gradziuk Piotr, Barbara Gradziuk. 2016a. Economical and ecological efficiency of solar systems (A case study at the communes Gorzkow and Rudnik). *Barometr Regionalny. Analizy i Prognozy* 14 (3): 189-195.

- Gradziuk Piotr, Barbara Gradziuk. 2016b. Efektywność ekonomiczna mikroinstalacji fotowoltaicznych (Economic efficiency of photovoltaic microinstallations). *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu XVIII* (3): 89-94.
- Gradziuk Piotr, Barbara Gradziuk. 2017a. An attempt to evaluate absorption of the funds from the operational program infrastructure and environment within action "Generation of energy from renewable sources". *Barometr Regionalny. Analizy i Prognozy 15* (1): 7-16.
- Gradziuk Piotr, Barbara Gradziuk. 2017b. Próba oceny absorpcji środków z funduszy europejskich na rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii w woj. lubelskim (The attempt of evaluation of absorption of the European funds for the development of use of renewable energy sources in Lubelskie Province). *Roczniki Naukowe Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich* 104 (3): 95-105.
- Gradziuk Piotr, Barbara Gradziuk. 2019. Economic profitability of investment in a photovoltaic plant in South-East Poland. *Annals of the Polish Association of Agricultural and Agribusiness Economists XXI* (3): 124-133.
- Gradziuk Piotr, Barbara Gradziuk, Anna Us. 2018. Tendencje kształtowania się kosztów inwestycyjnych w sektorze fotowoltaicznym (PV power plants sector – investment costs trends). *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu XX* (1): 44-49.
- IEO (Instytut Energetyki Odnawialnej, Institute of Renewable Energy). 2022. *Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2022* (Photovoltaics market in Poland 2022). Warszawa: IEO.
- Komorowski Łukasz. 2018. Proces elektryfikacji polskiej wsi – ujęcie historyczne i terytorialne (The electrification process of the polish countryside – historical and territorial approach). *Annals of the Polish Association of Agricultural and Agribusiness Economists* 4 (XX): 85-90. DOI: 10.5604/01.3001.0012.2949.
- Lis Stanisław, Tomasz Szulc, Jozef Krilek, Ján Melichercik, Tomas Kuvik. 2022. Ocena efektywności ekonomicznej zastosowania magazynu energii w instalacji fotowoltaicznej pracującej w ramach programu Prosument (Assessment of the economic effectiveness of the use of energy storage in a photovoltaic installation operating under the Prosument program). *Przegląd Elektrotechniczny* 1: 92-95.
- Lugo-Laguna Daniel, Angel Arcos-Vargas, Fernando Nuñez-Hernandez. 2021. A European assessment of the solar energy cost: key factors and optimal technology. *Sustainability* 13 (6): 3238. DOI: 10.3390/su13063238.
- Manteuffel Ryszard. 1987. *Filozofia rolnictwa* (Philosophy of agriculture). Warszawa: PWN.
- Marona Michał, Maciej Tomczak. 2023. Dynamiczne taryfy w Europie: wyzwania i rozwiązania. Polskie realia w obliczu ujemnych cen energii z perspektywy SolarEdge (Dynamic tariffs in Europe: challenges and solutions. Polish realities in the face of negative energy prices from the perspective of SolarEdge). *Nowa Energia* 5-6 (91): 92-97.

- Mikołajuk Hanna, Mirosław Duda, Uroš Radović, Sławomir Skwierz, Michał Lewarski, Iwona Kowal. 2016. *Aktualizacja analizy porównawczej kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych, węglowych i gazowych oraz odnawialnych źródłach energii* (Updated comparative analysis of electricity generation costs in nuclear, coal and gas power plants as well as renewable energy sources). Warszawa: Agencja Rynku Energii S.A.
- MKiŚ (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Ministry of Climate and Environment). 2021a. *Polityka Energetyczna Polski do 2040 r. Załącznik nr 2. Wnioski z analiz prognostycznych dla sektora elektroenergetycznego* (Poland's Energy Policy until 2040. Annex No. 2. Conclusions from forecast analyzes for the electricity sector). Warszawa: Ministry of Climate and Environment.
- MKiŚ (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Ministry of Climate and Environment). 2021b. *Nowe zasady rozliczeń prosumentów od 2022 roku* (New rules for prosumer settlements from 2022). Warszawa: Ministry of Climate and Environment.
- Ney Roman. 1994. *Energia odnawialna* (Renewable energy). *Nauka* 3: 43-66.
- Niklewicz-Pijaczyńska Małgorzata. 2022. Paradygmat prosumenta wobec aktualnych wyzwań transformacji energetycznej (The prosumer paradigm in the face of the current challenges of the energy transformation). *Folia Iuridica Universitatis Wratislaviensis* 11(2): 84-101. DOI: 10.34616/145039.
- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 19 maja 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo energetyczne*. Dz.U. 2022. poz. 1385. (Announcement of the Speaker of the Sejm of the Republic of Poland of May 19, 2022 on the announcement of the consolidated text of the Energy Law Act). Journal of Laws, 2022.1385.
- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 4 września 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o rynku mocy*. Dz.U. 2023, poz. 2131. Announcement of the Speaker of the Sejm of the Republic of Poland of September 4, 2023 on the announcement of the uniform text of the Capacity Market Act). Journal of Laws, 2023.2131.
- Odum Howard Thomas. 1996. *Environmental accounting – energy and environmental decision making*. New York: Wiley&Sons.
- PSE (Polskie Sieci Energetyczne, Polish Energy Networks). 2023a. *RCEm – rynkowa miesięczna cena energii elektrycznej* (RCEm – market monthly price of electricity), <https://www.pse.pl/oire/rcem-rynkowa-miesieczna-cena-energii-elektrycznej>, access; 10.11.2023.
- PSE (Polskie Sieci Energetyczne, Polish Energy Networks). 2023b. *Rynkowa cena energii elektrycznej (RCE)* (Market price of electricity (RCE)), <https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-rb/raporty-dobowe-z-funkcjonowania-rb/podstawowe-wskazniki-cenowe-i-kosztowe/rynkowa-cena-energii-elektrycznej-rce>, access: 20.11.2023.

- Renné David S. 2022. Progress, opportunities and challenges of achieving net-zero emissions and 100% renewable. *Solar Compass* 1: 100007. DOI: 10.1016/j.solcom.2022.100007.
- Rey Sergi Obrador, Juan Alberto Romero, Lluís Trilla Romero, Àlber Filbà Martínez, Xavier Sanchez Roger, Muhammad Attique Qamar, José Luis Domínguez-García, Levon Gevorgov. 2023. Powering the future: a comprehensive review of battery energy storage systems. *Energies* 16: 6344. DOI: 10.3390/en16176344.
- Sandvall Akram Fakhri, Erik Ahlgren, Tomas Ekvall. 2017. Cost-efficiency of urban heating strategies – modelling scale effects of low-energy building heat supply. *Energy Strategy Reviews* 18: 212-223. DOI: 10.1016/J.ESR.2017.10.003.
- Smil Vaclav. 1994. *Energy in world history*. Boulder, San Francisco, Oxford: Westview Press.
- Sołtysik Maciej, Mariusz Kozakiewicz, Jakub Jasiński. 2021. Profitability of prosumers according to various business models – an analysis in the light of the COVID-19 effect. *Energies* 14: 8488. DOI: 10.3390/en14248488.
- Sołtysik Maciej, Mariusz Kozakiewicz, Jakub Jasiński. 2022. Improvement of operating efficiency of energy cooperatives with the use of “crypto-coin mining”. *Energies* 15: 8061. DOI:10.3390/en1521806.
- Ślusarz Grzegorz, Barbara Gołębiwska, Marek Cierpień-Wolan, Dariusz Twaróg, Jarosław Gołębiwski, Sebastian Wójcik. 2021. The role of agriculture and rural areas in the development of autonomous energy regions in Poland. *Energies* 14 (13): 4033. DOI: 10.3390/en14134033.
- Woś Augustyn, Józef Zegar. 2002. *Rolnictwo społecznie zrównoważone* (Socially sustainable agriculture). Warszawa: IERiGŻ.
- Żylicz Tomasz. 2012. Ekonomia wobec wspierania odnawialnych źródeł energii. [W] *Generacja rozproszona w nowoczesnej polityce energetycznej – wybrane problemy i wyzwania* (Economics towards supporting renewable energy sources. [In] *Distributed generation in modern energy policy – selected problems and challenges*), ed. Rączka Jan, Swora Mariusz, Stawiany Wojciech, 46-50. Warszawa: NFOŚiGW.

\*\*\*

## ECONOMIC EFFECTIVENESS OF THE USE OF ENERGY STORAGE IN A PROSUMER PHOTOVOLTAIC INSTALLATION

Key words: renewable energy sources, prosumer photovoltaic installation, energy storage, levelized costs of electricity, farm, NPV, DPBT

**ABSTRACT.** The purpose of the article is to evaluate the economic efficiency of electricity generation in a prosumer photovoltaic installation supported by energy storage billed in the net-billing model. The subject of the study was a comparative analysis for two variants, i.e. 1) reference (photovoltaic installation only) and 2) hybrid (supported by energy storage). The Levelized Costs of Electricity (LCOE), Net Present Value (NPV) and Dynamic Pay Back Time (DPBT) methods were used to evaluate it. The object of the study was a dairy farm, where a prosumer photovoltaic system with a capacity of 19.62 kWp was installed along with an energy storage of 10 kWh. The study shows that with the current billing system in place, the unit cost of electricity generation in the reference variant was more than 40% lower than the value calculated in this way for a photovoltaic system equipped with energy storage. The simulation carried out for dynamic tariffs, which will be in operation from July 01, 2024, showed that the use of energy storage can favorably affect the economic efficiency of photovoltaic installations, but it requires the installation of a smart energy balance management system.

### AUTHORS

PIOTR GRADZIUK DR HAB. PROF. IRAD PAS

ORCID: 0000-0003-0825-6281

Institute of Rural and Agricultural Development

Polish Academy of Sciences

e-mail: pgradziuk@irwirpan.waw.pl

ANNA TROCEWICZ, MSC

ORCID: 0000-0002-7630-417X

John Paul II University in Biala Podlaska

Faculty of Economic Sciences

e-mail: a.trocewicz@dyd.akademiabialska.pl

---

Proposed citation of the article:

Gradziuk Piotr, Anna Trocewicz. 2023. Ekonomiczna efektywność zastosowania magazynu energii w prosumencie-kiej instalacji fotowoltaicznej. *Annals PAAAE XXV* (4): 76-91.