

## Analiza techniczno-ekonomiczna oraz ocena możliwości budowy instalacji agrowoltaicznej na bazie istniejącej elektrowni słonecznej

**Streszczenie.** Celem pracy jest wykazanie wielowymiarowych korzyści wynikających ze zbudowania systemu fotowoltaicznego na terenach rolnych przeznaczonych pod uprawę szparagów. Przeprowadzone zostaną analizy energetyczne, agronomiczne oraz ekonomiczne. Na potrzeby szeroko zakrojonych analiz energetycznych wykorzystane będą dane nasłonecznienia i produkcji energii elektrycznej pochodzące z istniejącej elektrowni słonecznej położonej na terenie zachodniej Ukrainy. Analiza agronomiczna z kolei obejmie dogłębną analizę warunków uprawy szparagów na żyznych ziemiach ukraińskich z uwzględnieniem warunków pogodowych, jakości gleby oraz potrzeb nawadniania roślin. Istotną częścią pracy będzie również analiza ekonomiczna określająca opłacalność przeprowadzenia inwestycji budowy farmy agrofotowoltaicznej. Kalkulacje ekonomiczne przeprowadzone będą na podstawie analizy średnich cen energii elektrycznej oraz cen skupu szparagów, obowiązujących dla rynku ukraińskiego. W podsumowaniu pracy zaproponowane zostaną również możliwe sposoby usprawnienia systemu agrofotowoltaicznego oraz uzasadnienie takiego wyboru.

**Abstract.** The aim of the paper is to demonstrate the multidimensional benefits resulting from building a photovoltaic system in agricultural areas intended for asparagus cultivation. Energy, agronomic and economic analyses will be conducted. For the purposes of extensive energy analyses, solar irradiation and energy production data from an existing solar power plant located in western Ukraine will be used. The agronomic analysis, in turn, will include an in-depth analysis of the conditions for growing asparagus in fertile Ukrainian lands, taking into account weather conditions, soil quality and plant irrigation needs. An important part of this paper will also be an economic analysis determining the profitability of the investment in building an agrophotovoltaic farm. Economic calculations will be made based on the analysis of average electricity prices and asparagus purchase prices applicable to the Ukrainian market. Economic calculations will be carried out on the basis of an analysis of average electricity prices and asparagus purchase prices applicable to the Ukrainian market. The summary of the work will also propose possible ways to improve the agrophotovoltaic system and justify such a choice. **(Technical and economic analysis and assessment of the possibility of building an agrophotovoltaic installation based on an existing solar power plant).**

**Słowa kluczowe:** system agrofotowoltaiczny, energetyka odnawialna, elektrownia słoneczna, analiza techniczno-ekonomiczna.

**Keywords:** agrophotovoltaic system, renewable energy, solar power plant, technical-economic analysis.

### Wstęp

Od kolejnej dekady świat zmaga się z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, podczas gdy zasoby paliw kopalnych zmniejszają się z każdym rokiem. Odnawialne źródła energii nabierają coraz większego znaczenia, aby sprostać tym współczesnym wyzwaniom. Na szczególną uwagę zasługują systemy fotowoltaiczne, które mają ogromny potencjał i mogą być uważane za bardziej efektywne niż fotosynteza, jeśli chodzi o wykorzystanie energii słonecznej [1]. Wiele z tych systemów na świecie jest instalowanych na terenach, które mogą być wykorzystywane pod uprawy rolne. Powoduje to nieracjonalne wykorzystanie zasobów ziemi oraz konflikty dotyczące użytkowania gruntów pomiędzy produkcją energii elektrycznej, a produkcją rolną. Duże obszary ziemi wykorzystywane pod budowę naziemnych instalacji fotowoltaicznych budzą obawy ludzi zaniepokojonych utratą gruntów odpowiednich dla rolnictwa [2]. Biorąc pod uwagę ten konflikt, rozwój systemów agrofotowoltaicznych (APV), których to koncepcja została zaproponowana już w latach 80. XX wieku przez Getzbergera i Zastrova, można interpretować jako metodę podwójnej korzyści: łączenie produkcji energii elektrycznej oraz produktów rolnych na tym samym obszarze [3].

Niektóre z pierwszych eksperymentów z technologią APV oraz badania jej wpływu na produkcję rolną wykazały, że wykorzystanie zasobów ziemi poprzez połączenie instalacji paneli słonecznych i uprawianie ziemi może być bardziej efektywne niż ich indywidualne wykorzystanie [4,5]. Zwiększając gęstość zainstalowania paneli fotowoltaicznych, można osiągnąć nie tylko wzrost produkcji energii elektrycznej, ale także efekt ekonomiczny wynikający z redukcji promieniowania epidermalnego, jakie otrzymują rośliny uprawne. To potwierdza zasadność

połączenia prowadzenia upraw rolnych i produkcji energii elektrycznej (rys.1).



Rys.1. Idea działania systemu agrofotowoltaicznego [14]

Innym problemem jest działanie elektrowni słonecznych w ramach systemów elektroenergetycznych, kiedy maksymalna produkcja energii elektrycznej często zbiega się z niskim zapotrzebowaniem na energię elektryczną. W takich sytuacjach dystrybutorzy energii wprowadzają ograniczenia dotyczące dostarczania mocy przez farmy PV do systemu elektroenergetycznego, co zmniejsza wydajność takich elektrowni. Nadwyżka wygenerowanej energii mogłaby zostać wykorzystana lokalnie na obszarze farmy PV, na przykład do zasilania systemów nawadniania roślin uprawnych. Chociaż światowe doświadczenie w badaniach nad agrofotowoltaiką nie jest jeszcze bogate, można stwierdzić, że APV ma pozytywny wpływ na branżę energetyczną i rolnictwo [6-8]. Potwierdza to potrzebę i celowość wdrażania takich systemów oraz prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

### Zakres przeprowadzonych badań

Przedmiotem badań jest wykazanie korzyści ze stosowania systemów agrofotowoltaicznych. Jako obiekt badań wybrano jedną z istniejących elektrowni słonecznych na Ukrainie. Analiza danych produkcji energii elektrycznej z funkcjonującej farmy fotowoltaicznej będzie lepszym wskaźnikiem, niż teoretyczne symulacje wykorzystujące poziomy nasłonecznienia na danym obszarze. Badania pozwolą także wykazać, że możliwe jest zwiększenie efektywności działania odnawialnych źródeł energii, które będą współgrały z racjonalnym wykorzystaniem zasobów ziemi, co pozytywnie wpłynie na poziom rolnictwa.

Dla osiągnięcia założonego celu zrealizowane zostaną następujące zadania:

- wykonanie analizy funkcjonowania działającej elektrowni słonecznej Hlyniany SPP (solar power plant) w ramach systemu elektroenergetycznego Ukrainy,
- zbadanie trybów pracy odcinka sieci elektroenergetycznej prowadzącego z elektrowni PV Hlyniany SPP i ustalenie na tej podstawie zasadności stworzenia systemu agrofotowoltaicznego,
- wybranie uprawy rolnej, którą można by uprawiać na terenie istniejącej farmy fotowoltaicznej oraz przeprowadzenie ekonomicznej analizy wykonalności stworzenia takiego systemu agrofotowoltaicznego.

### Postępy w rozwoju systemów agrofotowoltaicznych

Na kontynencie europejskim stawia się dopiero pierwsze kroki w zakresie instalacji i użytkowania systemów agrofotowoltaicznych. Niektóre z tych systemów zostały zbudowane jako warianty testowe do celów badawczych, zwłaszcza w Niemczech i Francji. Włochy z kolei obecnie posiadają największe instalacje tego typu. Komercyjne projekty o nazwie "Agrovoltaico", o mocy 1500 kW, zlokalizowane na północy tego kraju, wykorzystują moduły słoneczne zainstalowane na wysokości 4-5 m, wyposażone w systemy śledzenia słońca (trackery) [9,10]. Kolejnym przykładem zastosowania agrofotowoltaiki jest pole w Abruzji, gdzie panele słoneczne generują moc 800 kW [11]. Jeden z systemów agrofotowoltaicznych został zbudowany na południu Francji w celu badania rozkładu energii słonecznej [12]. Jednocześnie analizowano wpływ systemu na wzrost i rozwój roślin, ich plonowanie oraz warunki mikroklimatyczne. Wyniki badań wykazały, że zwiększenie efektywności systemów agrofotowoltaicznych można osiągnąć dzięki zastosowaniu trackerów [13,14].

W Chile, w pobliżu Santiago de Chile, zbudowano badawczy system agrofotowoltaiczny we współpracy z Fraunhofer Chile Research – Centrum Technologii Energii Słonecznej. Badano tam wpływ wdrożenia w różnych strefach klimatycznych energii pochodzącej z APV [15].

W ostatnich latach w Arizonie, w USA, powstało centrum badawcze APV na obszarze Biosphere 2 [16,17]. W placówce tej badano wpływ zacielenia jaki dają panele PV na wzrost roślin oraz jak transpiracja (odparowanie wody z roślin) wpływa na chłodzenie paneli słonecznych.

W ślad za doświadczeniem zdobytym w krajach Europy i Ameryki, również Chiny wdrożyły systemy agrofotowoltaiczne na dużą skalę. Chińczycy budują instalacje APV o mocy dochodzącej nawet do 700 MW, które wyposażone w dodatkowe funkcje, takie jak systemy nawadniania roślin i śledzenia słońca [18,19]. Największy jak do tej pory system APV o mocy 700 MW został oddany do użytku w Ningxi [18].

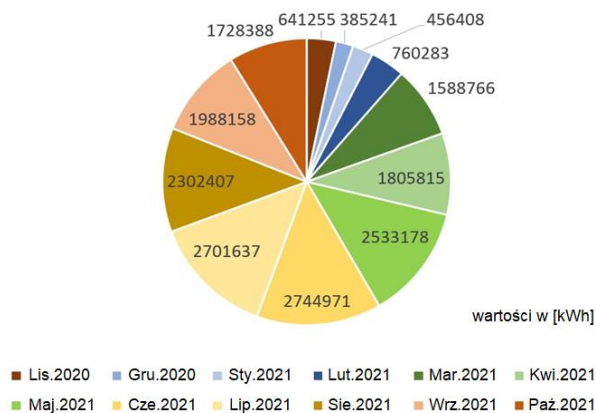
Obecnie, analizując dane z różnych krajów Świata, doświadczenie w zakresie powstawania systemów agrofotowoltaicznych nie jest zbyt duże. Wpływ APV na wzrost, rozwój oraz plonowanie roślin został słabo zbadany. Kraje z ograniczonymi zasobami ziem uprawnych mają

duże perspektywy wykorzystania takich technologii. Ośrodki badawcze APV w Europie czy Chinach dostarczają coraz więcej pozytywnych informacji na temat dużego potencjału jaki niosą ze sobą badane systemy [20-23].

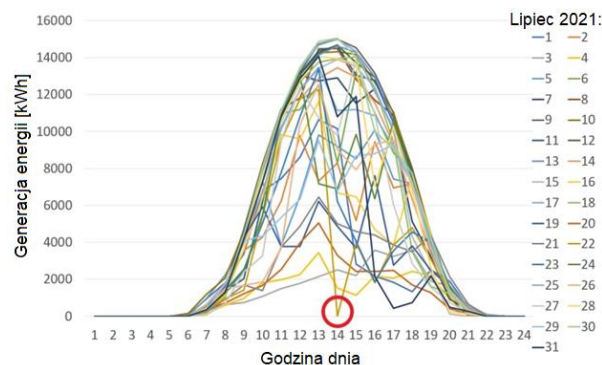
### Analiza pracy farmy fotowoltaicznej Hlyniany SPP

Elektrownia słoneczna Hlyniany SPP znajduje się w zachodniej części Ukrainy, w pobliżu miasta Hlyniany, w obwodzie lwowskim. Została ona oddana do użytku w 2019 roku i ma zainstalowaną moc 18,26 MW. W elektrowni zamontowano 63240 modułów słonecznych typu TSM-PE06H o mocy 285-290 W. Do konwersji prądu stałego na prąd zmienny, który jest wprowadzany do sieci elektroenergetycznej, wykorzystuje się 140 falowników typu SUN2000-105KTL-H1. Energia dostarczana jest do sieci poprzez 5 transformatorów 0,8/35 kV o mocy 3200 kVA każdy. Całkowita powierzchnia elektrowni wynosi 36,85 ha, z czego 10,77 ha znajduje się pod panelami słonecznymi, z kolei 450 m<sup>2</sup> zajmują stacje transformatorowe. Pozostały obszar obejmuje budynki biurowo-techniczne, drogi, podjazdy oraz tereny zielone.

Analiza danych dotyczących godzinowej produkcji energii elektrycznej dla każdego dnia roku w elektrowni Hlyniany SPP pokazuje, że najbardziej produktywnymi miesiącami są czerwiec i lipiec (rys. 2). Okresy te charakteryzują się również najdłuższym czasem generowania energii w ciągu dnia. W trakcie tej analizy zidentyfikowano specyficzne godziny w ciągu dnia, w których obserwuje się bardzo wysoką dzienną generację energii elektrycznej, po czym następuje gwałtowny spadek produkcji do zera. Zjawisko to jest spowodowane ograniczeniem generacji energii przez farmę PV ze względu na nadwyżkę energii w systemie elektroenergetycznym. W związku z powyższym około godziny 14:00 dnia 22 lipca 2021 roku nastąpiło wyłączenie elektrowni PV (rys. 3).



Rys.2. Rozkład całkowitej produkcji energii elektrycznej dla każdego miesiąca w ciągu roku

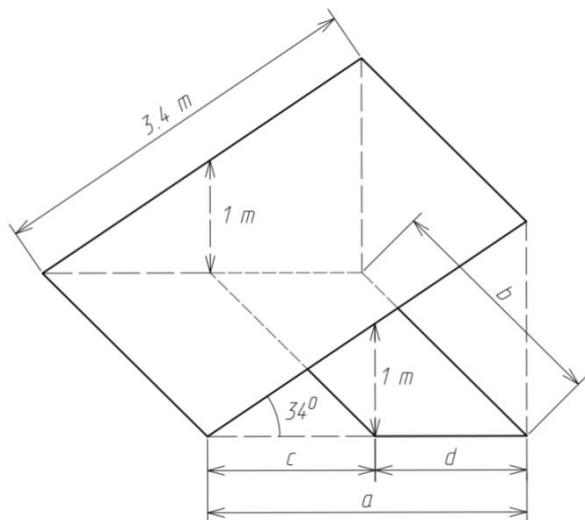


Rys.3. Godzinna produkcja energii każdego dnia w lipcu 2021 roku



### Studium wykonalności systemu agrofotowoltaicznego

Biorąc pod uwagę warunki pogodowe i ilość opadów w rejonie Hłyniany SPP według źródła [25], pod uprawę wybrano odmianę hybrydową szparagów Cumulus F1. Odmiana ta może być sadzona na obszarze pod panelami słonecznymi, przy założeniu, że wysokość od ziemi do panelu wyniesie co najmniej 1 metr, co zapewni wygodę podczas uprawy i obróbki roślin. W związku z tym, że dolna krawędź panelu znajduje się na poziomie podłoża, a nachylenie wynosi  $34^\circ$ , tylko część gruntu pod panelem może zostać efektywnie wykorzystane pod uprawy (rys.5). Realny obszar pod uprawy wyniesie około 5,11 ha.



Rys.5. Rzut modułu PV na płaszczyznę ziemi, gdzie:  $a = 2,82$  m,  $b = 2,42$  m (to realna długość obszaru do sadzenia sadzonek pod panelem),  $c = 1,48$  m,  $d = 1,34$  m (to realna szerokość obszaru do sadzenia sadzonek pod panelem)

Aby uzyskać wysokiej jakości plony, konieczne jest zapewnienie szparagom odpowiedniej ilości wilgoci i nawozów. Najlepszym sposobem na rozwiązanie tego problemu jest nawadnianie kropłowe. Zapotrzebowanie wodne szparagów w okresie wegetacyjnym wynosi około  $2000 \text{ m}^3/\text{ha}$  [26]. Najważniejsze dla roślin okresy to wiosna i lato, które charakteryzują się wysokimi temperaturami i małą ilością opadów, co często prowadzi do niekorzystnych warunków wzrostu spowodowanych suszą. Największa liczba ograniczeń w produkcji energii elektrycznej w elektrowni Hłyniany SPP przypada na ten sam okres roku.

Żeby szparagom zapewnić odpowiednią ilość wody wiosną należy przeprowadzić 3 nawadniania w ilości  $250 \text{ m}^3/\text{ha}$ , a latem 3 nawadniania w ilości  $450 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Proponuje się zatem użycie stacji pompującej wodę typu 3GPE EVMSG10/3.0 z trzema niezależnymi pompami w celu zorganizowania nawadniania plantacji szparagów. Zainstalowana moc każdej pompy wynosi  $P = 3 \text{ kW}$ , a wydajność pompowania wody w takim systemie to  $Q = 45 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Żeby nawodnić rośliny zgodnie z wymaganiami pompy będą musiały pracować wiosną 17 h, a latem 30 h. Zużycie energii elektrycznej na nawodnienie jednego hektara szparagów na sezon wyniesie około 423 kWh. Planowana plantacja ma powierzchnię nieco ponad 5 ha, dlatego też instalacja nawadniająca dla systemu agrofotowoltaicznego będzie wymagała 5 stacji pompowania wody, co oznacza, że łączna zainstalowana moc wszystkich stacji nawadniających wyniesie 45 kW. Roczne zużycie energii elektrycznej na potrzeby tego systemu nawadniania wyniesie 2115 kWh. Należy jednak podkreślić, że istnieje możliwość niezależnej lub naprzemiennej pracy każdej pompy wody z oddzielną

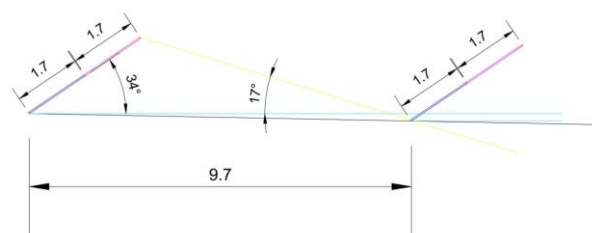
regulacją. Dlatego też wystąpi dodatkowe zużycie energii na działanie urządzeń pomocniczych, takich jak inwertery, systemy komputerowe, różnego rodzaju czujniki, sterowniki, itp. Po uwzględnieniu dodatkowych urządzeń roczne zużycie energii wzrośnie do blisko 2350 kWh, a łączna moc całej instalacji nawadniania wyniesie około 50 kW.

Liczbę sadzonek szparagów na 1 hektar powierzchni uprawnej można obliczyć według wzoru (1) [27]:

$$(1) \quad N = \frac{100}{M} \cdot \frac{100}{A} = \frac{100}{9,7} \cdot \frac{100}{0,2} = 5155 \frac{\text{szt}}{\text{ha}}$$

gdzie:  $N$  – liczba sztuk sadzonek na 1 ha,  $M = 9,7$  m – odległość między rzędami sadzonek (rys.6),  $A = 0,2$  m – odległość między sadzonkami w rzędzie na metr bieżący.

Obliczenia wskazują, że do obsadzenia jednego hektara potrzebnych jest 5155 sadzonek szparagów, natomiast cała plantacja 5,11 ha będzie wymagać  $N_t = 26341$  sadzonek.



Rys.6. Rysunek poglądowy rozstawienia poszczególnych rzędów ogniw fotowoltaicznych w elektrowni Hłyniany SPP

Żeby obliczyć średni plon wykorzystano dane F. Belane [28] dotyczące uprawy szparagów, według których średnia liczba roślin  $n_p$  podczas zbiorów wyniesie odpowiednio 3; 16,6; 24,5; 26,4 i 27,5 sztuki dla każdego z pierwszych pięciu lat uprawy. Średnia masa rośliny  $m_p$  w ciągu pierwszych pięciu lat wyniesie odpowiednio 18,1; 22,8; 25,5; 25,6 i 25,9 g. Aby obliczyć szacowany plon szparagów w danym roku  $Y$ , należy pomnożyć liczbę sadzonek przez średnią liczbę roślin ze zbioru i średnią masę rośliny (2). Zatem dla pierwszego roku zbiorów:

$$(2) \quad Y = N_t \cdot n_p \cdot m_p = 26341 \cdot 3 \cdot 18,1 = 1430 \text{ kg}$$

gdzie:  $Y$  – szacowany plon szparagów [kg],  $N_t$  – liczba sadzonek na plantacji [szt.],  $n_p$  – średnia liczba roślin podczas zbiorów [szt.],  $m_p$  – średnia masa jednej rośliny podczas zbiorów [g].

Zatem w pierwszym roku zbiorów możemy spodziewać się plonu wielkości 1430 kg szparagów, a w kolejnych latach odpowiednio 9970, 16457, 17802 i 18761 kg.

Dla zwiększenia plonów z planowanej plantacji szparagów proponuje się zastosowanie fertygacji (podawanie nawozów w płynnej formie podczas procesu nawadniania). Fertygacja może zwiększyć plon szparagów o 10-30% [29], co będzie miało znaczący wpływ na całkowity plon w kolejnych latach uprawy i dodatkowo podniesie efektywność całego systemu APV. Wyniki obliczeń dotyczących szacowanych zbiorów bez oraz z zastosowaniem nawożenia przedstawiono w Tabeli 1.

Przeprowadzenie analizy opłacalności projektu budowy systemu agrofotowoltaicznego wymagało przeanalizowania ukraińskiego rynku rolnego oraz rynku energii. Oszacowano średnie ceny podstawowych materiałów, urządzeń oraz koszty pracy niezbędne do stworzenia takiego systemu.

Zestawienie wyników kalkulacji wraz z szacowanymi zyskami i okresem zwrotu inwestycji (przy założeniu zwiększonego o 20% plonu szparagów dzięki zainstalowaniu systemu nawadniającego oraz fertygacji) przedstawiono w Tabeli 2. W obliczeniach uwzględniono również planowany zakup i montaż folii ochronnej, która ograniczając proces fotosyntezy, pozwoli uzyskać białe szparagi. Bez zastosowania folii uzyskano by szparagi zielone, które są znacznie tańsze od białych. Średnia cena za kilogram białych szparagów na Ukrainie wynosi około 4,95 € za kilogram, zaś zielonych około 3,75 €/kg.

Tabela 1. Szacowane plony bez oraz z zastosowaniem fertygacji w ciągu kolejnych 5 lat uprawy szparagów [30]

Rok zbiorów	Szacowane plony bez nawożenia	Szacowane zwiększone o 10, 20, 30% plony dzięki zastosowaniu fertygacji		
	Y[kg]	Y <sub>+10%</sub> [kg]	Y <sub>+20%</sub> [kg]	Y <sub>+30%</sub> [kg]
1	1430	1573	1716	1859
2	9970	10966	11963	12960
3	16457	18102	19748	21394
4	17802	19583	21363	23143
5	18761	20638	22514	24390

Podobne obliczenia przeprowadzono dla innych wariantów plonowania, a także dla uprawy zwykłych szparagów. Analiza uzyskanych wyników pokazała, że ze względu na znacznie wyższą cenę białych szparagów oraz wzrost plonów dzięki instalacji systemu nawadniającego wraz z odpowiednim nawożeniem, opisany w artykule wariant uprawy szparagów jest najbardziej efektywny. Okres zwrotu takiej inwestycji wyniesie około 3 lata.

Szacowany zysk w ciągu pierwszych 5 lat eksploatacji proponowanej uprawy szparagów Cumulus F1 wyniesie około 248182 € przy założeniu 20% zwiększenia plonów, dzięki nawodnieniu z fertygacją. Jeżeli jednak plony wzrosłyby o 10 lub 30%, okres zwrotu inwestycji pozostałby taki sam, natomiast pięcioletni zysk wyniósłby odpowiednio 215624 € oraz 279409 € [30].

Tabela 2. Zestawienie kosztów oraz zysków z inwestycji w projekt systemu agrofotowoltaicznego (przy założonym 20% wzroście plonów szparagów, dzięki zastosowaniu instalacji nawadniającej umożliwiającej jednocześnie nawożenie roślin) [30]

Ceny w €	Kolejne lata					
	0	1	2	3	4	5
Zakup sadzonek	60848	0	0	0	0	0
Przygotowanie gleby	1650	0	0	0	0	0
Formowanie grządek i kultywacja	1650	0	0	0	0	0
Posadzenie sadzonek	1980	0	0	0	0	0
Zakup i montaż systemu nawadniającego	13200	0	0	0	0	0
Koszt zużytej energii elektrycznej	226	226	226	226	226	226
Zakup nawozów i pestycydów	3300	1980	1980	1980	1980	1980
Zakup i montaż folii ochronnej	12210	0	0	12210	0	0
Opłacenie pracowników podczas zbiorów	0	2970	2970	3300	3300	3630
Koszty	95064	5176	5176	17716	5506	5836
Dochody	0	8494	59217	97753	105747	111444
Zyski	-95064	3318	54041	80037	100241	105608
Zwrot inwestycji	-95064	-91745	-37704	42332	100241	105608
Uzyskane plony szparagów [kg]	0	1716	11963	19748	21363	22514

## Podsumowanie

Podczas analizy warunków pracy elektrowni słonecznej Hlyniany SPP, zidentyfikowano ciekawe zjawisko: w środku dnia w okresie letnim przy bardzo wysokiej generacji energii elektrycznej, w pewnym momencie następuje gwałtowny spadek generacji do zera. Zjawisko to jest spowodowane ograniczeniami systemu elektroenergetycznego, poprzez które w wyniku nadwyżki energii elektrycznej w systemie, farma fotowoltaiczna musiała zostać wyłączona [30].

Badania trybów pracy sieci elektroenergetycznej w otoczeniu elektrowni Hlyniany SPP wykazały, że istnieją pewne ograniczenia dotyczące dostarczania energii do sieci przez elektrownię, zarówno w normalnym stanie sieci, jak i w przypadkach awarii lub serwisowania odcinków linii napowietrznych. Prowadzi to do zmniejszenia efektywności wykorzystania zainstalowanej mocy, poprzez ograniczenie produkcji energii lub całkowite odłączenie farmy PV [30]. Żeby zapobiec tym mankamentom, proponuje się wprowadzenie systemu agrofotowoltaicznego.

Studium wykonalności projektu systemu agrofotowoltaicznego opartego na istniejącej elektrowni Hlyniany SPP pokazuje, że okres zwrotu inwestycji nie przekroczy 3 lat. Wdrożenie takiego podejścia pozwoli również na [30]:

- bardziej efektywne wykorzystanie zasobów gruntów rolnych, zwłaszcza w przypadku małych krajów,
- zwiększenie plonów roślin, które mogą być uprawiane na terenie elektrowni fotowoltaicznej,
- wyeliminowanie ograniczeń w przekazywaniu wygenerowanej energii do sieci elektroenergetycznej, poprzez jej bezpośrednie zużycie na miejscu.

Biorąc pod uwagę wszystkie wcześniej wykazane zalety wdrażania systemów agrofotowoltaicznych, istnieją pewne przeszkody w praktycznej realizacji takich projektów, z których główną jest chociażby krajowe ustawodawstwo. W niektórych państwach niedozwolone jest wykorzystanie gruntów rolnych do celów energetycznych. W związku z tym konieczne jest przeprowadzenie dalszych, szczegółowych badań i analiz dotyczących efektywności stosowania systemów APV, których celem będzie uzasadnienie potrzeby wprowadzenia zmian w prawnych.

**Autorzy:** mgr inż. Andrii Dutko, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Andrii.Dutko@student.put.poznan.pl; dr inż. Łukasz Putz, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Lukasz.Putz@put.poznan.pl; dr inż. Jan Szymenderski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Jan.Szymenderski@put.poznan.pl; dr inż. Andrii Yatsenko, Politechnika Lwowska, Instytut Energetyki i Systemów Sterowania, ul. S. Bandery 12, 79-013 Lwów, E-mail: Andrii.Yatsenko@lpndu.ua.

## LITERATURA

- [1] Blankenship R., Tiede D., Barber J., W. Brudvig G., Fleming G., Ghirardi M., Gunner M., Junge W., Kramer D., Melis A., Moore T., Moser C., G. Nocera D., Nozik A., R. Ort D., Parson W., Prince R., Sayre R. (2011) Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. *Science* (New York, NY). 332. <https://doi.org/10.1126/science.1200165>
- [2] Nonhebel S. (2005) Renewable energy and food supply: will there be enough country? *Renew. Sust. Energy Rev.* 9:191–201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.02.003>
- [3] Goetzberger A., Zastrow A. (1982) On the coexistence of solar energy conversion and plant cultivation. *Int. J. Solar Energy.* 1:55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- [4] Valle B., Simonneau T., Sourd F., Pechier P., Hamard P., Frisson T., Ryckewaert M., Christophe A. (2017) Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Appl. Energy.* 206:1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>
- [5] Elamri Y., Cheviron B., Lopez J.M., Dejean C., Belaud G. (2018) Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: application that irrigated lettuces. *Agric. Water Manag.* 208:440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>
- [6] Hannah L., Roehrdanz P.R., Ikegami M., Shepard A.V., Shaw M.R., Tabor G., Zhi L., Marquet P.A., Hijmans R.J. (2013) Climate change, wine, and conservation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 110:6907–6912. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>
- [7] Hassanpour Adeb E., Selker J.S., Higgins C.W. (2018) Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE* 13(11):e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- [8] Ravi S., Macknick J., Lobell D., Field C., Ganesan K., Jain R., Elchinger M., Stoltenberg B. (2016) Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands. *Appl. Energy.* 165:383–392. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.078>
- [9] Casarin D. (2012) R.E.M. Talk about the "Agrivoltaic": when agriculture discovers the photovoltaic, [Electronic resource]. Access mode: <http://www.genitronsviluppo.com/2012/07/30/rem-agrovoltaico/> (in Italian)
- [10] Rem Tec (2017) AGROVOLTAICO® TECHNOLOGY, [Electronic resource]. Access mode: <https://www.remtec.energy/en/agrovoltaico/>
- [11] Corditec (2017) Our plant – Eco Field, [Electronic resource]. Access mode: <http://corditec.it/solare/pagecampo.php?page=impianto&title=campo%20d%27eco&id=77> (in Italian)
- [12] Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y. (2011) Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimizing land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renew. Energy.* 36: 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- [13] Marrou H., Dufour L., Wery J. (2013) How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil – crop system? *Eur. J. Agron.* 50:38–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>
- [14] Valle B., Simonneau T., Sourd F., Pechier P., Hamard P., Frisson T., Ryckewaert M., Christophe A. (2017) Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Appl. Energy.* 206:1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>
- [15] Fraunhofer Chile Research (2017) FIC AGRO PV Metropolitan Region: project progress. Presentation. March 2017. (in Spanish)
- [16] Kinney K., Minor R., Barron-Gafford G. (2016) Testing predictions used to build an agrivoltaics installation on a small scale educational model. University of Montana, [Electronic resource]. Access mode: <http://digitalcommons.calpoly.edu/star/386>
- [17] Pallone T. (2017) Agrivoltaics: how plants grown under Solar panels can benefit humankind, [Electronic resource]. Access mode: <http://insights.globalspec.com/article/4802/agrivoltaics-how-plants-grown-under-solar-panels-can-benefit-humankind?id=-777656564>
- [18] A. Weselek, A. Ehmann, S. Zikeli, I. Lewandowski, S. Schindele, et al. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39 (4), pp.35. [ff10.1007/s13593-019-0581-3ff.fhal-02877032](https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3ff.fhal-02877032)
- [19] Tonking New Energy (2018) Changshan PV station, [Electronic resource]. Access mode: [http://tonkingtech.com/english/news\\_show.aspx?newsCateid=117&NewsId=137](http://tonkingtech.com/english/news_show.aspx?newsCateid=117&NewsId=137)
- [20] Campana P.E., Leduc S., Kim M., Olsson A., Zhang J., Liu J., Kraxner F., McCallum I., Li H., Yan J. (2017) Suitable and optimal locations for implementing photovoltaic water pumping systems for grassland irrigation in China. *Appl. Energy.* 185:1879–1889. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.004>
- [21] Du F., Deng W., Yang M., Wang H., Mao R., Shao J., Fan J., Chen Y., Fu Y., Li C., He X., Zhu Y., Zhu S. (2015) Protecting grapevines from rainfall in rainy conditions reduces disease severity and enhances profitability. *Crop Prot.* 67:261–268. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.10.024>
- [22] Amaducci S., Yin X., Colauzzi M. (2018) Agrivoltaic systems that optimize land use for electric energy production. *Appl. Energy.* 220:545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- [23] Zoellner J., Schweizer-Ries P., Wemheuer C. (2008) Public acceptance of renewable energies: results from case studies in Germany. *Energy Policy.* 36:4136–4141. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.026>
- [24] DAKAR Eleks. Real-time power system management tool for modeling, analysis, planning, and optimization of modern electrical networks. [Electronic resource]. Access mode: <https://dakar.eleks.com/en/>
- [25] State register of plant varieties suitable for distribution in Ukraine. Kyiv: Derzhkomstat of Ukraine, 2020. 447 p. (in Ukrainian)
- [26] I.S. Kudinenko. Mathematics of agribusiness: cultivation of asparagus. 2018. [Electronic resource]. Access mode: <https://kurkul.com/blog/584-matematika-agrobiznesu-viroshchuvannya-sparji> (in Ukrainian)
- [27] Mariupol Farm "AZOV". How many seedlings per hectare – Calculator. [Electronic resource]. Access mode: <https://plodopitomnik.com.ua/raschet-sazhencev-na-gektar/> (in Ukrainian)
- [28] F. Belane. Asparagus. - *Agropromizdat*, 1986.- 128 p. (in Russian)
- [29] N. Biliera. Fertigation is innovative approach to fertilization of agricultural crops. *Agronom.* – 12.07.2018 [Electronic resource]. Access mode: <https://www.agronom.com.ua/fertygatsiya-innovatsijnyj-pidhid-do-udobrennya-kultur>. (in Ukrainian)
- [30] Dutko A., Technical and economic analysis and evaluation of the efficiency of the creation of an agrivoltaic installation on the basis of an existing photovoltaic power plant, Master thesis, Poznan University of Technology, (2022)