EnergoMiting – transformacja energetyki do elektroprosumeryzmu

Modelowanie bilansów energetycznych OZE w osłonach samorządowych JST oraz w systemach(WSE) na trajektoriach transformacyjnych 2021→2050

Krzysztof Bodzek

22 listopada 2022

Trajektorie transformacyjne - krzywa logistyczna (krzywa S)

Równanie krzywej logistycznej w odniesieniu do transformacji energetycznej

$$E(t) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-ct}} + d$$

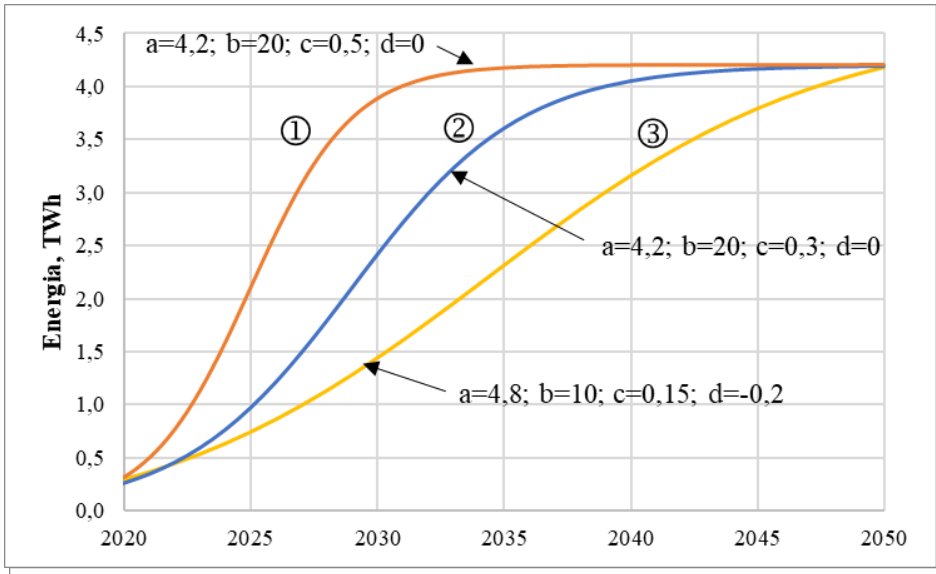
a – wartość oczekiwana (po wysyceniu rynku),
b – czas transformacji,
c – tempo transformacji,
d – wartość początkowa

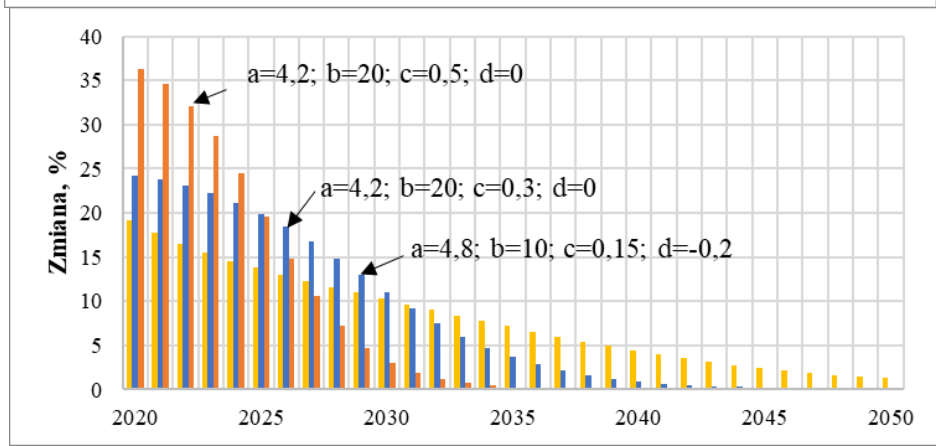
Wpływ parametrów krzywej logistycznej na trajektorie transformacyjne

① - technologie skomercjalizowane

② - technologie „dojrzałe”

③ - technologii we wczesnej fazie rozwoju





Im współczynnik *c* (tempo transformacji) jest większy, tym osiągnięcie wartości oczekiwanej, jest szybsze.

Odwzorowanie zapotrzebowania KSE

Dwa okresy:

okres socjalizmu - z „dynamicznie" rozwijającą się gospodarką i stanem wojennym

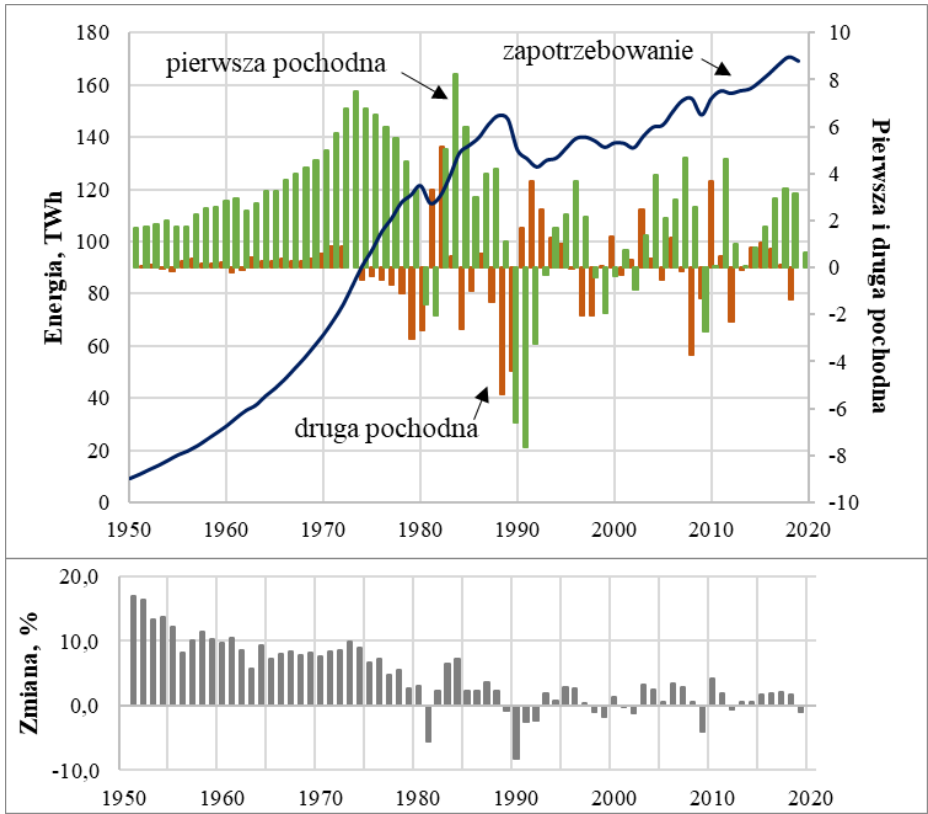
okres III RP - początkowo gwałtowny spadek zapotrzebowania (aż do roku 1993), następnie znacznie mniej uporządkowany, bo podlegający częściowo wpływowi rynku, okres wolnego wzrostu zapotrzebowania

Analiza pochodnych

Pierwsza pochodna - roczna zmiana mocy w wartościach bezwzględnych (TWh/r)

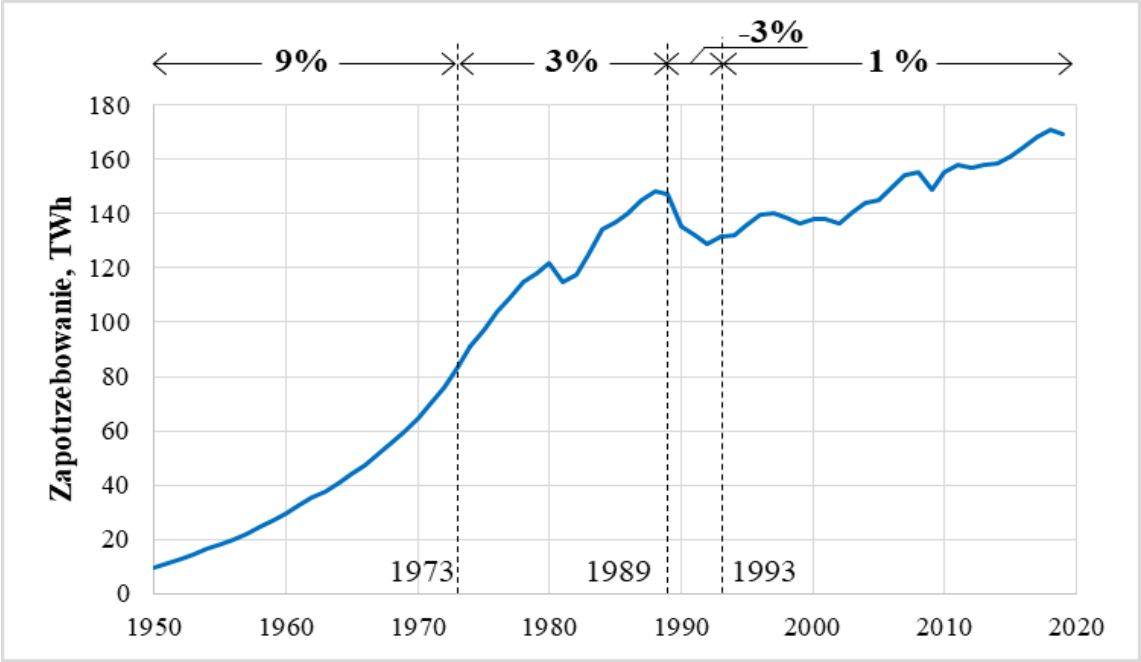
Druga pochodna - określa wypukłość funkcji, tendencję utrzymania wzrostu (w przypadku dodatniej wartości) oraz tendencję do stagnacji, wysycenia się rynku (w przypadku ujemnych wartości)

To również odpowiednik „zrywu" w kinematyce, czyli szybkości zmian. Im druga pochodna ma mniejszą wartość i im jej bezwzględne zmiany rok do roku są mniejsze, tym rynek jest bardziej kontrolowany (TWh/r^2)



Zmiana zapotrzebowania (procent składany)

obliczony na podstawie odcinkowej aproksymacji funkcją eksponencjalną



Cztery charakterystyczne okresy - wybrane na podstawie analizy pierwszej i drugiej pochodnej

Rzeczywiste zapotrzebowanie po roku 1993 stanowi początek okresu, dla którego określa się trajektorię transformacyjną.

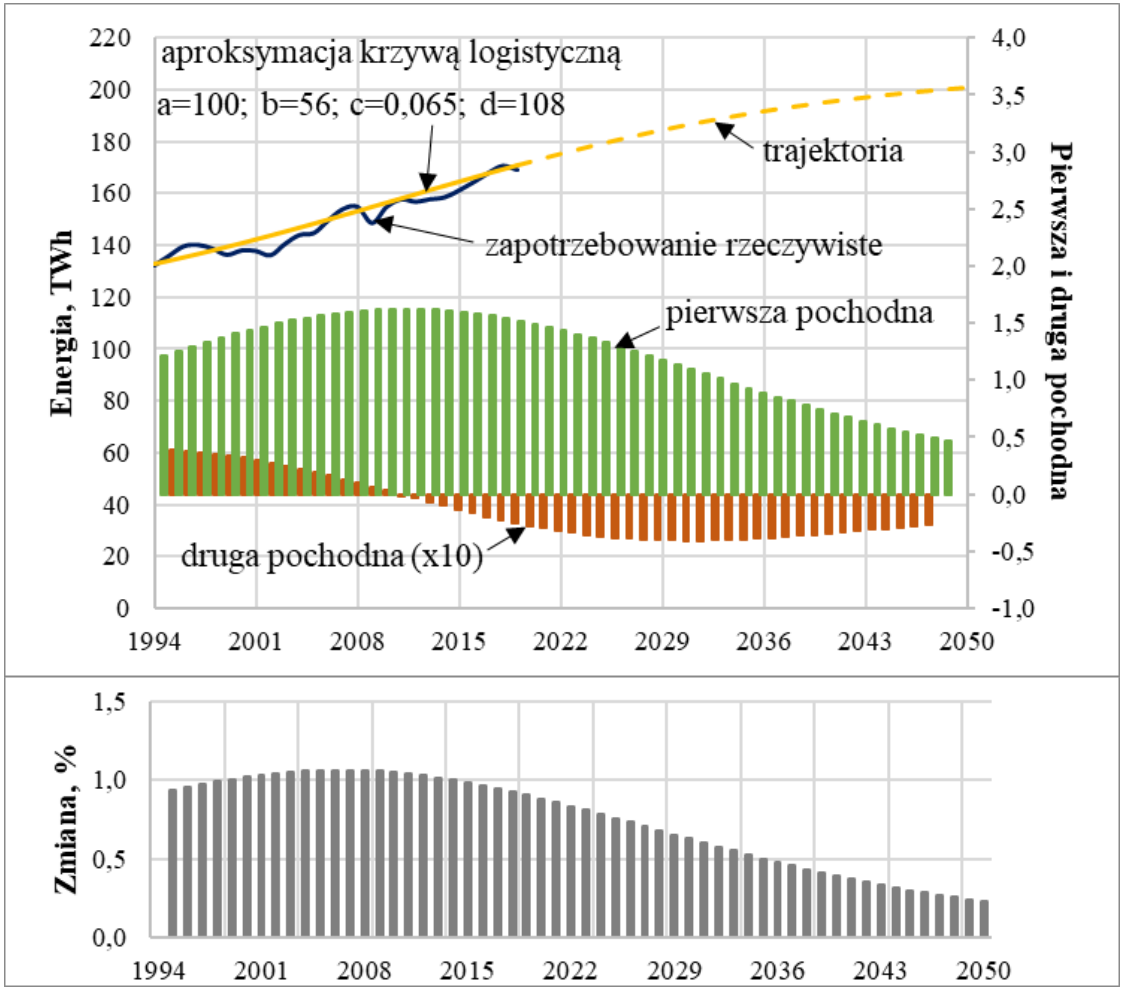
Cel elektroprosumeryzm - 200 TWh w roku 2050.

Aproksymacji zapotrzebowania krzywą logistyczną (do 2019 r)

Wyznaczenie trajektorii

powiązanie z czterema rynkami elektroprosumeryzmu, a w szczególności pasywizacją budownictwa, elektryfikacją ciepłownictwa oraz transportu.

Uwzględnione jedynie w sposób jakościowy, a nie ilościowy oraz przy założeniu, że znana jest końcowa wartość zapotrzebowania



Charakterystyka osłon kontrolnych OK(JST) w kontekście podziału administracyjnego

	Osłony	Mieszkańcy, mln	Zapotrzebowanie		Horyzont elektroprosumeryzmu
			TWh	%	
Miasta powyżej 500 tys.	OK(JST5), OK(JST6)	4,4	21	11	2050
Miasta 100 do 500 tys.	OK(JST4)	6,4	26	16	2050
Miasta 50 do 100 tys.	OK(JST3)	3,5	16	9	2045
Gminy miejsko-wiejskie do 50 tys.	OK(JST1), OK(JST2)	13,2	62	34	2040
Gminy wiejskie	OK(JST1), OK(JST2)	11	51	29	2035

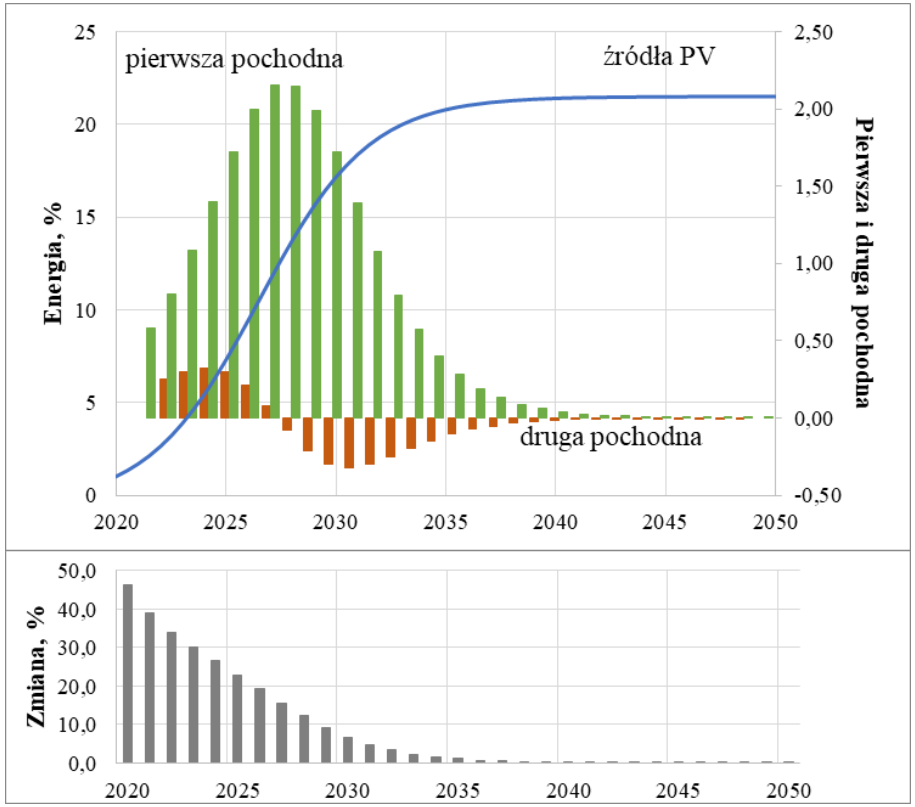
Struktura źródeł wytwórczych dla wybranych osłon OK(JST)*

	Osłona Kontrolna			
	OK(JST1)	OK(JST2)	OK(JST3)	OK(JST6)
	Względna produkcja energii $E^{\bullet}$, %			
źródła PV	40	40	32	20
mikroelektrownie wiatrowe	5	5	0	2
elektrownie wiatrowe	0	25	38	18
mikroelektrownie biogazowe	55	10	5	0
elektrownie biogazowe	0	20	25	5
mineralizacja (GOZ)	0	0	0	5
elektrownie wiatrowe offshore	0	0	0	38

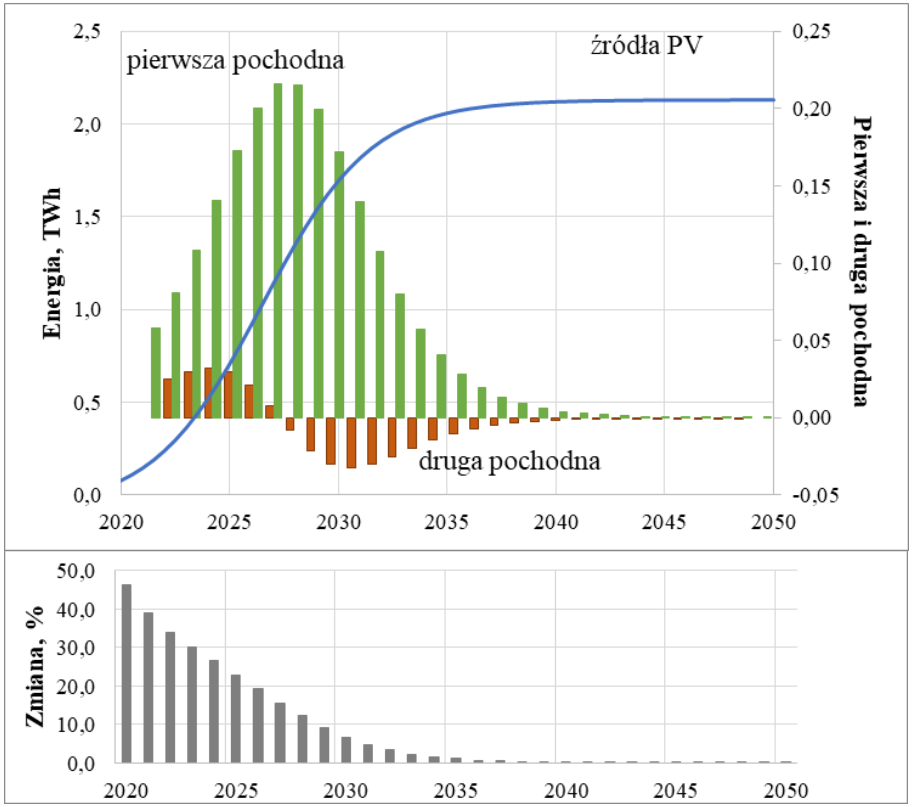
*Struktura prezentowana i omawiana w ramach poprzedniego EnergoMitingu

Trajektoria transformacyjna źródeł PV

jednostki względne



jednostki bezwzględne (energia)



Pierwsza pochodna

wartości względne - punkty procentowe rocznej zmiany energii względnej
wartości bezwzględne - roczna zmiana energii

Krzywe transformacyjne technologii

Dobór parametrów krzywej logistycznej dla każdej technologii uwzględniał stan początkowy (rok 2020), aktualny stan rozwoju technologii, koszt technologii, obecną tendencję w instalacji źródeł, potrzebę wdrożenia, oraz końcową wartość w horyzoncie transformacji dla każdej osłony kontrolnej

źródła PV – technologia skomercjalizowana, z dużą dynamiką wzrostu produkowanej energii i krótkim czasem osiągnięcia wartości docelowej

mikroelektrownie wiatrowe – technologia skomercjalizowana, ale droga wymagająca kolejnych generacji w celu obniżenia kosztów

elektrownie wiatrowe – technologia skomercjalizowana, najtańsza, jednak obecnie w Polsce blokowany jest jej rozwój, dlatego pomimo dużego potencjału rozwojowego założono, mniejszy przyrost w początkowym okresie, z maksimum przypadającym na lata 2030-2040

mikroelektrownie biogazowe – technologia w pierwszej fazie komercjalizacji i dużym kosztem produkcji energii elektrycznej, jednak z bardzo dużym potencjałem wdrożenia w szczególności na obszarach wiejskich z powodu możliwości bilansowania. Z tego powodu założono szybki rozwój technologii

Krzywe transformacyjne technologii

Dobór parametrów krzywej logistycznej dla każdej technologii uwzględniał stan początkowy (rok 2020), aktualny stan rozwoju technologii, koszt technologii, obecną tendencję w instalacji źródeł, potrzebę wdrożenia, oraz końcową wartość w horyzoncie transformacji dla każdej osłony kontrolnej

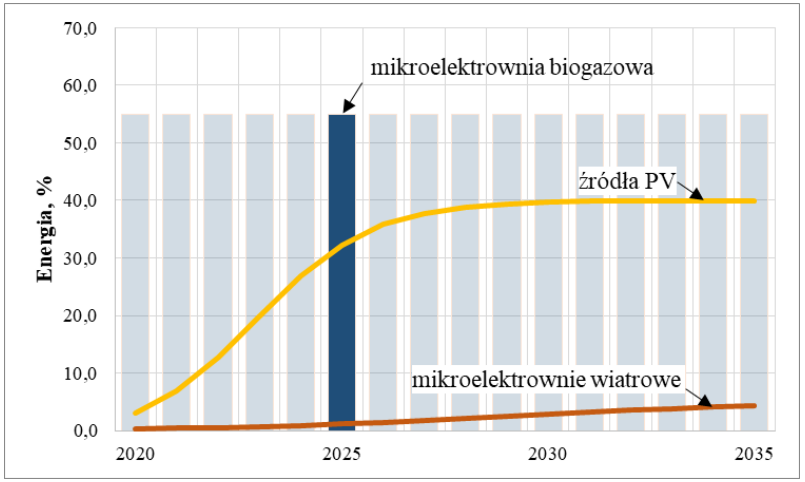
elektrownie biogazowe – technologia skomercjalizowana charakteryzująca się wysokim kosztem produkcji energii, ale ze względu na gwałtowny wzrost potrzeb lokalnego bilansowania założono jej szybki rozwój

mineralizacja (GOZ) – technologia w początkowej fazie komercjalizacji, jednak z bardzo dużym potencjałem wdrożenia, ze względu na potrzebę utylizacji odpadów i krótkim czasem zwrotu inwestycji. Założono szybki wzrost i stosunkowo szybkie osiągnięcie wartości docelowej (ograniczona dostępność odpadów)

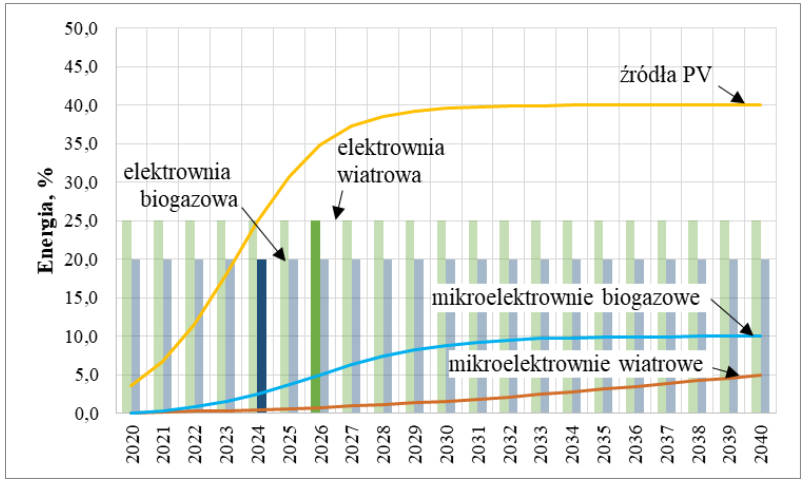
elektrownie offshore – założono, że pierwsze morskie elektrownie wiatrowe powstaną dopiero w roku 2027. Po tym okresie ich rozwój będzie szybki

Trajektorie transformacyjne osłon kontrolnych OK(JST)

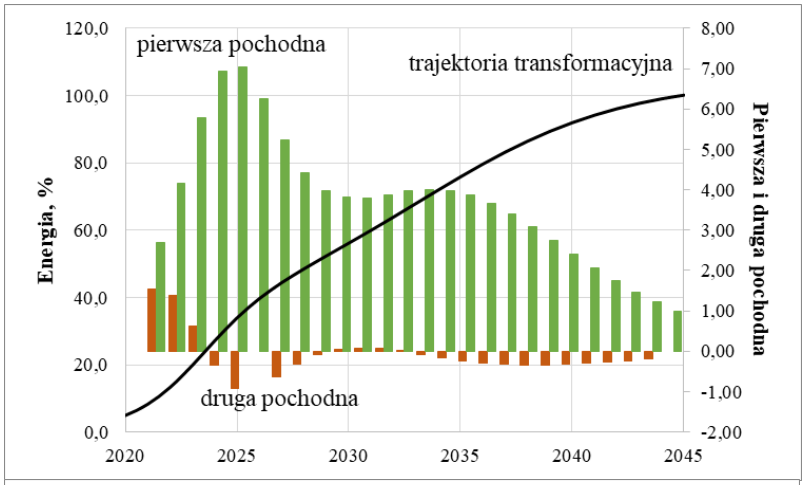
Osłona OK(JST1)

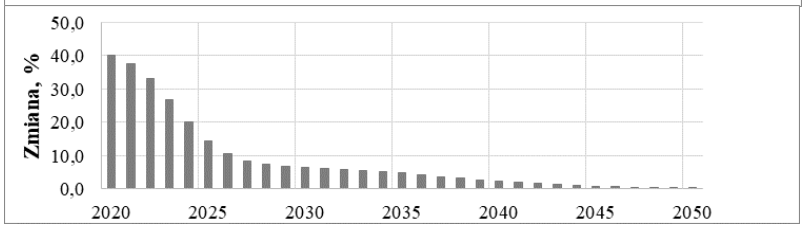


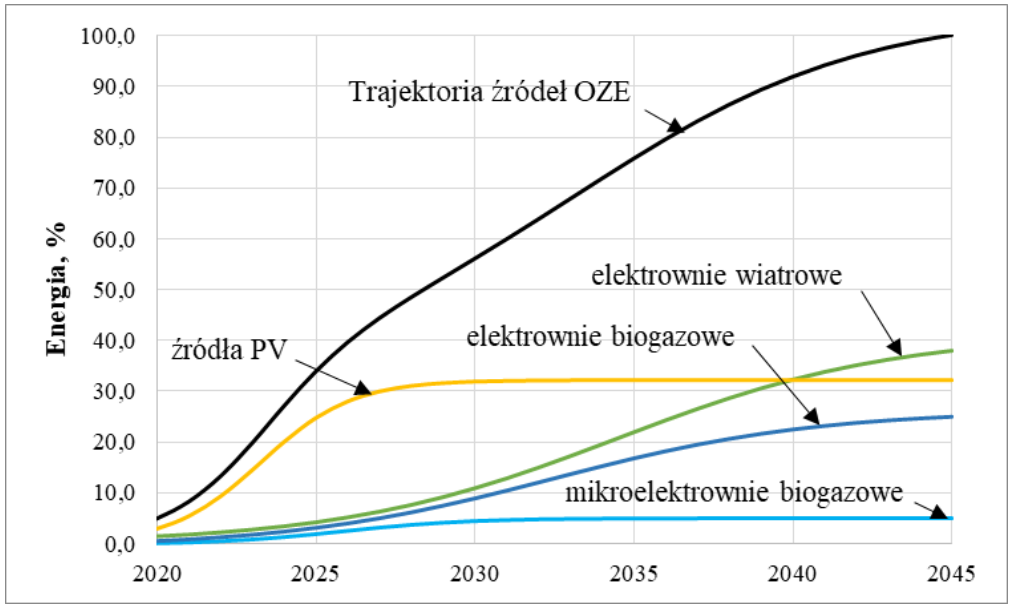
Osłona OK(JST2)



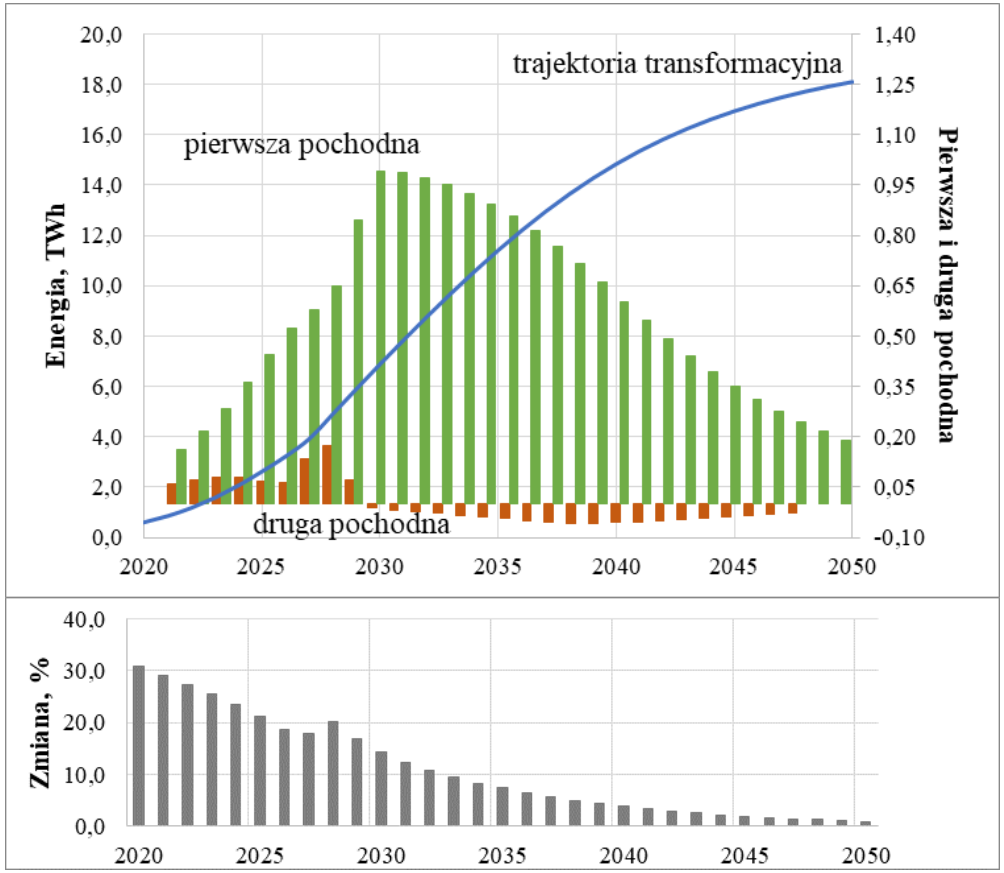
Osłona OK(JST3)



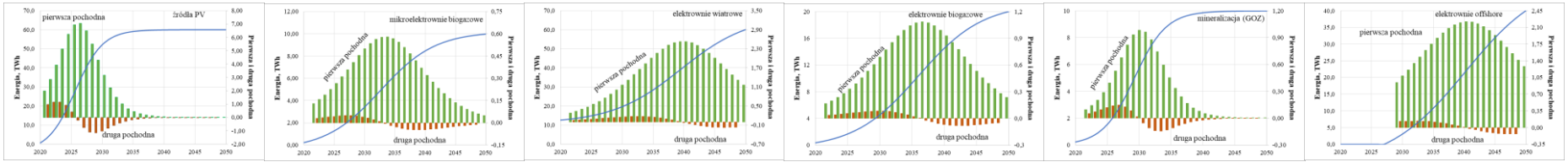




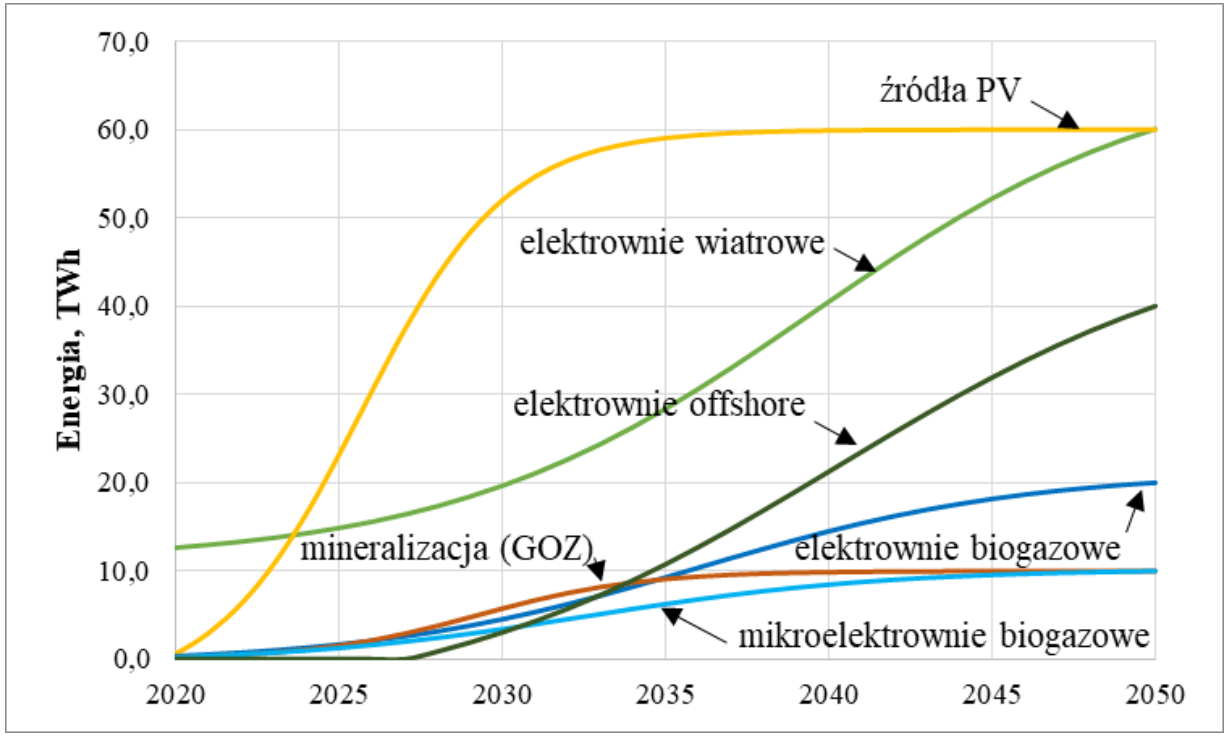
Osłona OK(JST6) - miasta powyżej 500 tys. mieszkańców



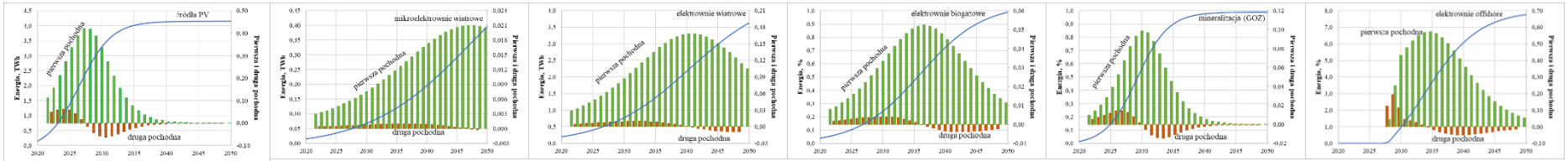
Trajektorie transformacyjne poszczególnych technologii



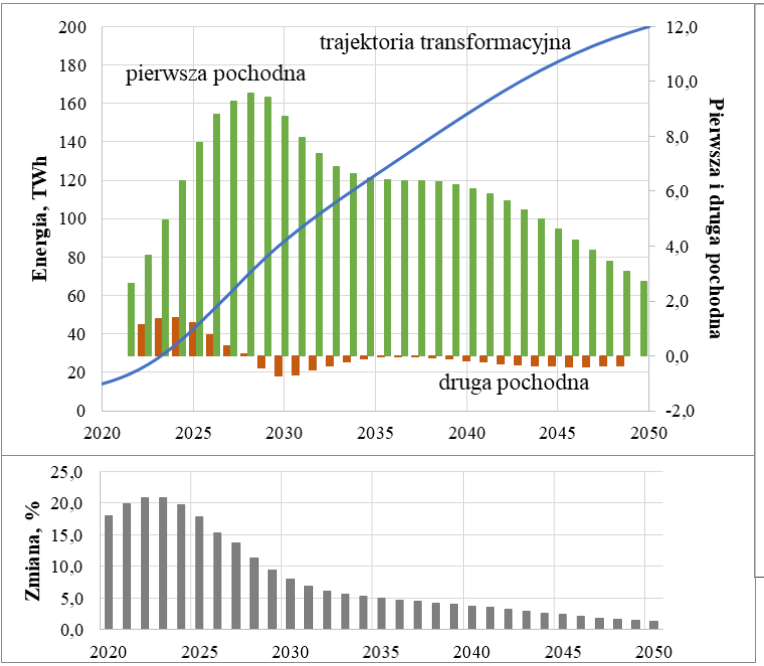
Trajektorie transformacyjne źródeł OZE

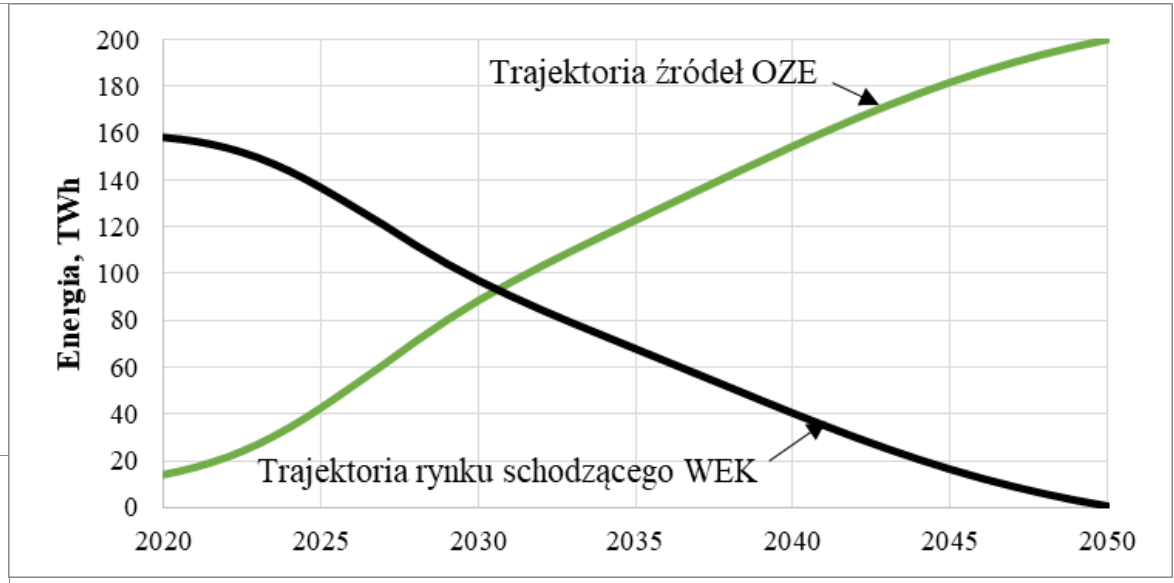


Trajektorie technologii



Trajektoria rynku schodzącego WEK

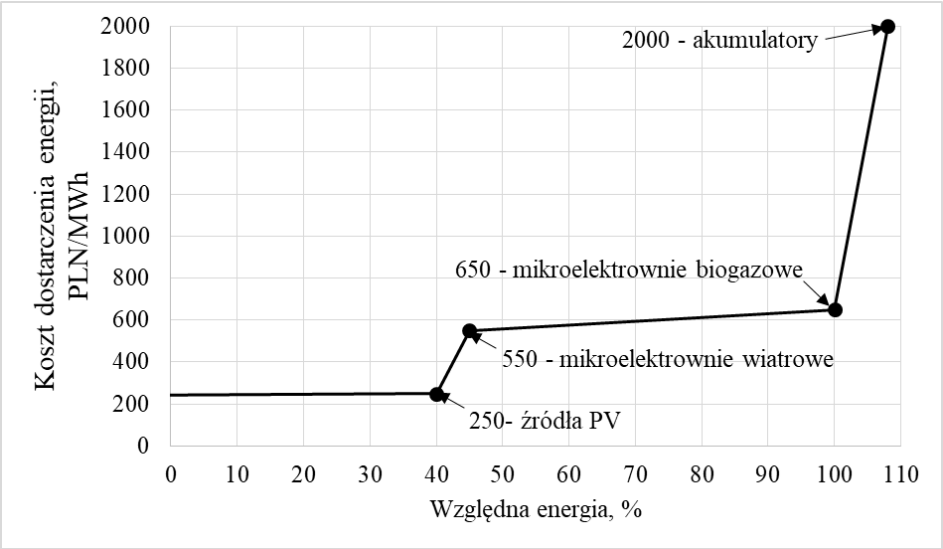




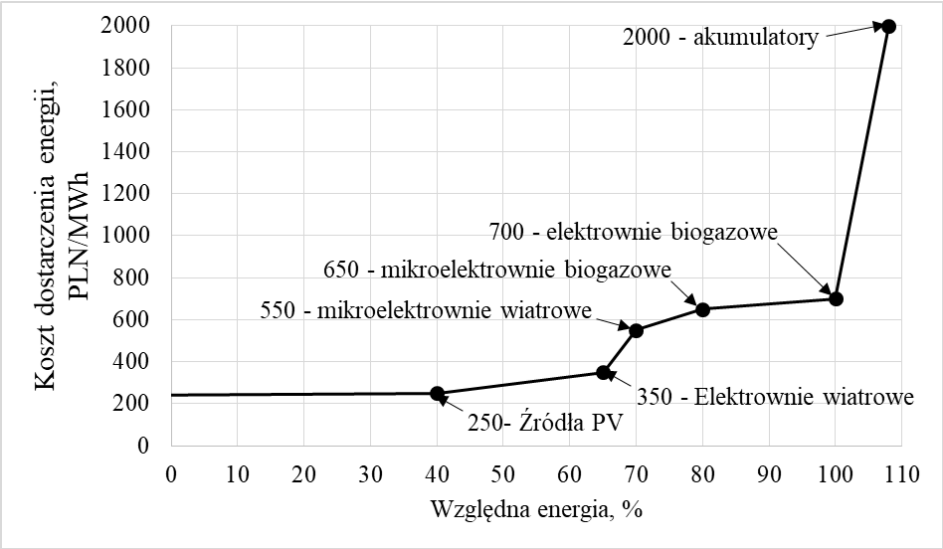
W roku 2030 udział wschodzących rynków elektroprosumeryzmu powinien przekroczyć 50 %

Koszty krańcowe dostaw energii elektrycznej w OK(JST)

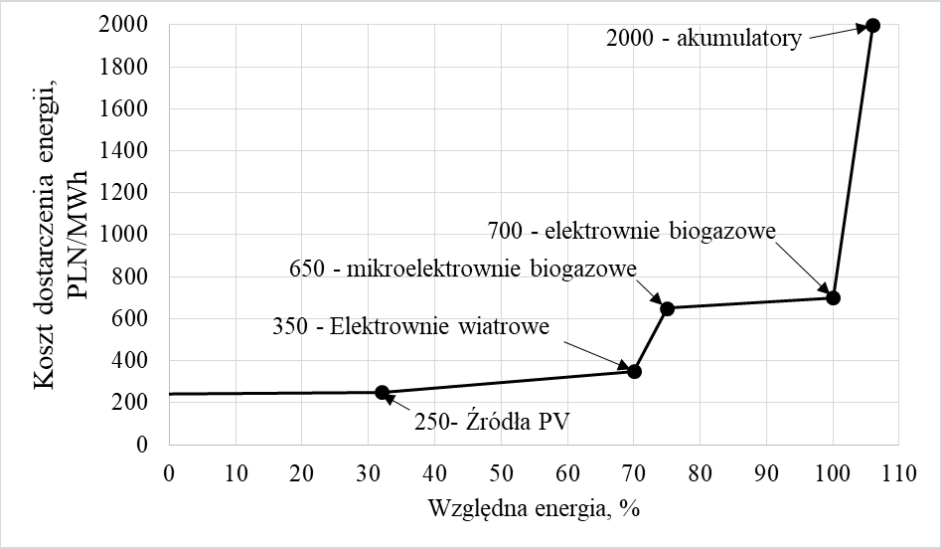
OK(JST1)
średnioroczny koszt: 485 PLN/MWh



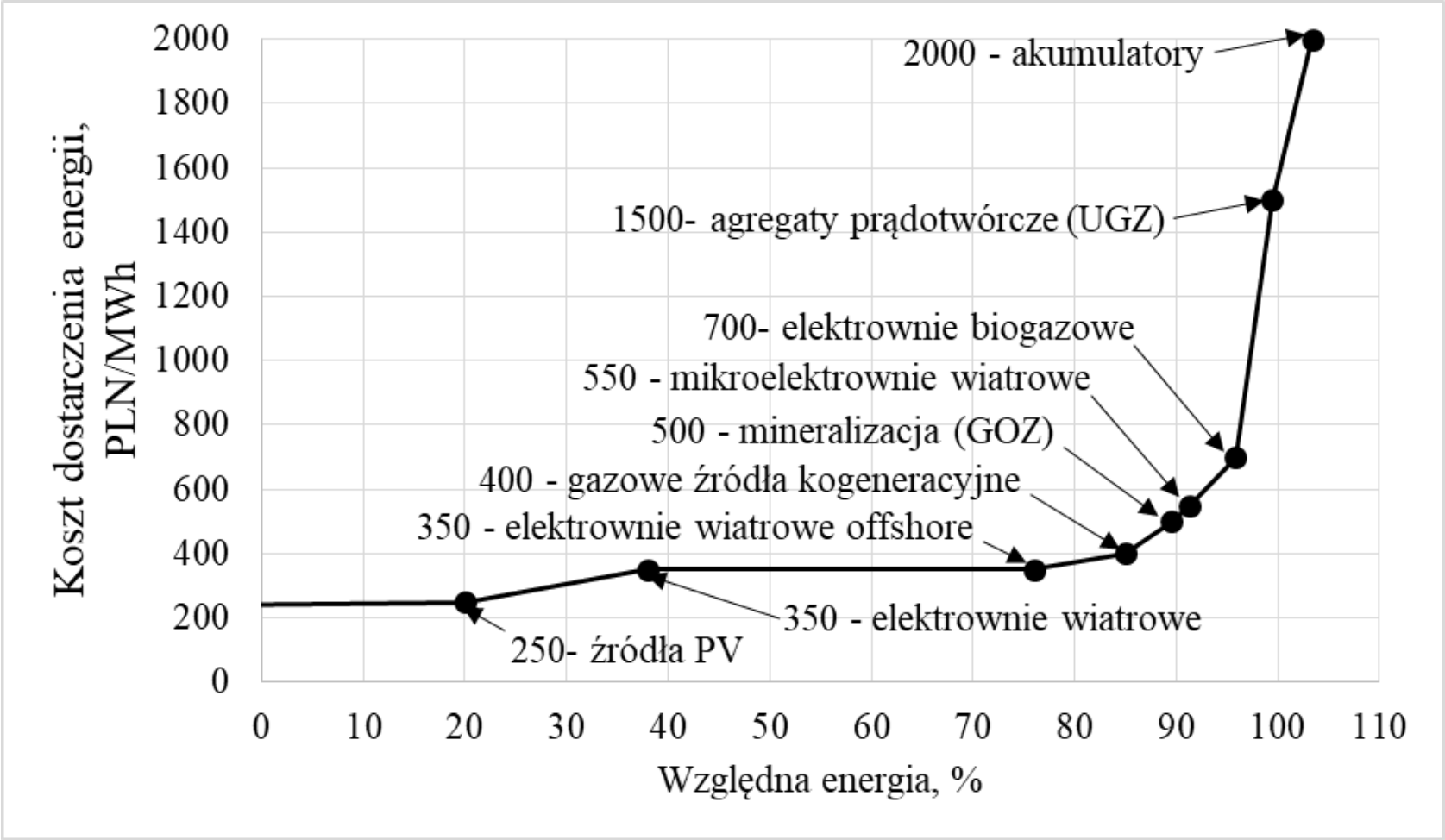
OK(JST2)
średnioroczny koszt: 420 PLN/MWh



OK(JST3)
średnioroczny koszt: 421 PLN/MWh



OK(JST6)
średnioroczny koszt: 400 PLN/MWh



Przykład wykorzystania praktycznego – trajektoria redukcji śladu CO_2 Subregionu Wałbrzyskiego

Oczekiwane zapotrzebowanie na energię elektryczną w elektroprosumeryzmie (współczynniki skalujące)

	Polska		**Współczynnik skalujący**		**Subregion Wałbrzyski**		
	Obecnie	**2050**			**Obecnie**	**Horyzont transformacji**	
Energia elektryczna, TWh	165	200	model 1	0,5	0,21	2035	**0,25**
			model 2	0,7	1,01	2040	**1,18**
			model 3	0,8	0,58	2045	**0,68**

Oczekiwane potrzeby energetyczne w elektroprosumeryzmie (współczynniki skalujące)

	Polska		Współczynnik skalujący	Subregion Wałbrzyski	
	Obecnie	2050		Obecnie	2045
Ciepło grzewcze, TWh	170	30	1,5	2,9	**0,45**
CWU, TWh	40	30	1,0	0,7	**0,30**
Paliwa, TWh	220	60	0,8	3,7	**0,50**

Przykład wykorzystania praktycznego – trajektoria redukcji śladu CO_2 Subregionu Wałbrzyskiego

Kluczowe punkty na trajektorii wzrostu rynku wschodzącego OZE-RCR z podziałem na trzy modele transformacyjne Subregionu Wałbrzyskiego

– energia elektryczna

	model 1		model 2			model 3			
	2030	2035	2030	2035	2040	2030	2035	2040	2045
Zapotrzebowanie, TWh	0,22	0,25	1,07	1,12	1,18	0,64	0,65	0,67	0,68
Suma OZE, %	87,6	100,0	68,9	90,8	100,0	56,1	75,7	91,8	100,0
Produkcja energii z OZE (redukcja produkcji z WEK-PK), TWh	**0,22**	**0,25**	**0,81**	**1,07**	**1,18**	**0,38**	**0,52**	**0,63**	**0,68**

– ciepło

	ciepło grzewcze				CWU			
	2030	2035	2040	2045	2030	2035	2040	2045
Zapotrzebowanie Rynek WEK-PK, TWh	2,0	1,4	0,8	0	0,5	0,4	0,2	0
Uniknięta produkcja energii na rynku WEK-PK, (po pasywizacji budownictwa i elektryfikacji ciepłownictwa), TWh	0,9	1,5	2,1	2,9	0,2	0,4	0,5	0,7

– paliwa transportowe

	paliwa			
	2030	2035	2040	2045
Zapotrzebowanie - rynek WEK-PK, TWh	2,6	1,8	1,0	0
Uniknięta produkcja energii na rynku WEK-PK, (po elektryfikacji transportu), TWh	1,1	1,9	2,7	3,9

Przykład wykorzystania praktycznego – trajektoria redukcji śladu CO_2 Subregionu Wałbrzyskiego

Redukcja emisji CO_2

	Redukcja emisji, mln ton CO_2					Redukcja emisji CO_2 (dla bazy 2020), %
	Energia elektryczna	Ciepło	CWU	Paliwa transportowe	Razem	
2030	1,02	0,42	0,10	0,32	1,86	43
2035	1,32	0,70	0,17	0,52	2,71	63
2040	1,48	1,02	0,25	0,76	3,51	82
2045	1,52	1,39	0,34	1,04	4,28	100

Koszt elektroekologiczny - definicja

Miara wyczerpywania się nieodnawialnych bogactw naturalnych w elektroprosumeryzmie wiążąca się z produkcją energii elektrycznej **bezpośrednio w źródłach odnawialnych** (słonecznych, wiatrowych, wodnych), czyli **bez ponoszenia strat w procesach spalania i cieplnych**, i użytkowaniem jej (energii elektrycznej) do zaspokajania wszystkich potrzeb energetycznych, w tym potrzeb wszystkich elektrotechnologii realizowanych w środowisku cyfrowym.

Koszt elektroekologiczny (1) to suma pięciu składników powiązanych z pięcioma segmentami (obszarami) elektroprosumeryzmu:

$$KEE(EP) = \sum_{i=1}^{5} KEE(EP)_i$$

gdzie i:
1 – pasywizacja budownictwa,
2 – elektryfikacja ciepłownictwa,
3 – elektryfikacja transportu,
4 – użytkowanie energii elektrycznej i elektrotechnologie w środowisku cyfrowym i gospodarki GOZ,
5 – reelektryfikacja OZE.

Hipoteza:
Ograniczenie w koszcie elektroekologicznym (rozpatrywanym w perspektywie regulacji ustawy Prawo elektryczne) kosztów szkodliwych produktów odpadowych do jednego z nich, mianowicie emisji CO_2.

Najważniejsza w transformacji jest dynamika wschodzących rynków energii elektrycznej, ale również architektura („kształt") tych rynków. Dynamika jest powiązana przede wszystkim z mechanizmami rynkowymi w postaci kosztów krańcowych energii elektrycznej na rynku schodzącym energii elektrycznej, które są determinowane kosztami uprawnień do emisji CO_2; zatem na obecnym etapie jest racjonalne powiązanie kosztu elektroekologicznego z emisją CO_2.

Koszt elektroekologiczny – algorytm

W analizie uwzględnia się **skumulowany** ślad CO_2

Obliczenie kosztu elektroekologicznego

$$KEE = KEE_I + \sum GHG_i \cdot E_{ri} \cdot C_u CO_2$$

gdzie:

GHG_i - ślad CO_2 technologii i

E_{ri} - roczna energia technologii i

Obliczenie jednostkowego kosztu elektroekologicznego związanego z budową KEE_I

$$KEE_I = \frac{\sum GHG(M)_i \cdot C_u CO_2}{czas\ życia} \cdot E_r$$

gdzie:

$GHG(M)_i$ - ślad CO_2 materiału i

$C_u CO_2$ - koszt uprawnień

E_r - roczna produkcja

Obliczenie jednostkowego śladu CO_2 magazynu energii GHG_m

$$GHG_M = \frac{\sum GHG_{Wi} \cdot E_{rWi}}{\sum E_{rWi}} \cdot \frac{1}{\eta}$$

gdzie:

GHG_{Wi} - ślad CO_2 technologii wytwórczej i

E_{rWi} - roczna energia technologii wytwórczej i

η - sprawność magazynowania

Indukowanie kosztu w magazynach energii

Rozbudowa sieci w modelu WEK-PK(iEJ) i WEK-OZE

Koszt elektroekologiczny

Skumulowany ślad CO_2 wybranych produktów

Produkt	Skumulowany ślad CO_2, t CO_2/t produktu
Bloki stalowe	2,7
Produkty stalowe	1,9
Aluminium	8,5
Maszyny i urządzenia	1,0
Papier	2,9
Srebro	9,8
Produkty ropopochodne	3,6
Szkło	2,1
Drewno	1,1
Siarka	0,5
Beton	0,5

Skumulowany ślad CO_2 źródeł OZE

	Skumulowany ślad CO_2	TEC
	kg CO_2/MWh	MWh/MWh
GOZ	30	0,1
µEB	30	0,1
EB	30	0,1
EWL	30	0,1
PV	40	0,3
EWM	10	0,1

Analiza w środowisku kosztów krańcowych

Podatek graniczny (ang. Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)

Stanek W. i in.: Thermodynamics for Sustainable Management of Natural Resources, Springer International Publishing, 2017, DOI 10.1007/978-3-319-48649-9

Przykład wykorzystania praktycznego – koszt elektroekologiczny budowy elektrowni w modelu WEK-PK(iEJ)

Zużycie surowców potrzebnych do budowy elektrowni węglowych i gazowych

Materiał	Ślad CO_2 t CO_2/t	Zużycie surowców, t/MW		Ślad CO_2, t CO_2/MW	
		Elektrownia węglowa	Elektrownia gazowa	Elektrownia węglowa	Elektrownia gazowa
Beton	0,5	158,8	97,8	81,6	50,2
Stal	2,7	50,7	31,0	135,4	82,9
Aluminium	8,5	0,4	0,2	3,6	1,7
Żelazo	1,9	0,6	0,4	1,2	0,8
			SUMA	**220**	**135**

Zużycie surowców potrzebnych do budowy elektrowni jądrowych – istniejących i generacji III+

Materiał	Skumulowany ślad CO_2, t CO_2/t	Zużycie surowców, t/MW		Skumulowany ślad CO_2, t CO_2/MW	
		Istniejące	Generacja III+	Istniejące	Generacja III+
Ropopochodne	3,6	114	114	410	410
Stal	2,7	36	78	95	210
Beton	0,5	180	758	95	390
			SUMA	**600**	**1000**

Przykład wykorzystania praktycznego – koszt elektroekologiczny budowy elektrowni w modelu WEK-PK(iEJ)

Jednostkowy koszt elektroekologiczny budowy elektrowni w modelu WEK-PK(iEJ)

Koszt uprawnień, €/t CO_2	Kosz elektroekologiczny tys. €/MW			
	Elektrownia węglowa	Elektrownia gazowa	Istniejące elektrownie jądrowe	Elektrownie jądrowe - Generacja III+
25	5,5 (0,4 %)	3,4 (0,5 %)	15,0 (1,4 %)	25,0 (0,2 %)
50	11,0 (0,8 %)	6,8 (1,0 %)	30,0 (2,8 %)	50,0 (0,5 %)
75	16,5 (1,3 %)	10,1 (1,6 %)	45,0 (4,1 %)	75,0 (0,7 %)
100	22,0 (1,7 %)	13,5 (2,1 %)	60,0 (5,5 %)	100,0 (0,9 %)

Przykład wykorzystania praktycznego – koszt elektroekologiczny sieci przesyłowych

Obszar wyłączony z użytku przez linie przesyłowe

Rodzaj linii	Długość	Szerokość pasa technicznego	Obszar wyłączony z użytku	Całkowity obszar wyłączony z użytku	Uwagi
	km	m	ha/km	tys. ha	
110 kV	35000	40	4	140	Linie 110 kV będą wykorzystywane w elektroprosumeryzmie w obszarze miast powyżej 100 tys. mieszkańców
220 kV	7380	50	5	37	W modelu WEK-OZE zmniejsza się ich znaczenie na rzecz linii 400 kV
400 kV	7822	70	7	55	
750 kV	114	140	14	2	Linia wyłączona z użytku
			SUMA	233	7,5 ‰ powierzchni Polski

Obszar wyłączony z użytku przez linie przesyłowe

Rodzaj linii	Rozpiętość słupów	Zalecane przekroje przewodów	Waga linii (bez fundamentów), t/km	Waga fundamentów betonowych, t/km
110 kV	350	AFL-6-240 mm^2	31	150
220 kV	400	AFL-8-525 mm^2	37	210
400 kV	450	AFL-8-2x525 mm^2	85	300

Przykład wykorzystania praktycznego – koszt elektroekologiczny sieci przesyłowych

Zużycie surowców oraz ślad CO_2 linii przesyłowych

Rodzaj linii	Stal, t/km	Aluminium, t/km	Beton, t/km	Ślad CO_2, t CO_2/km
110 kV	17	18	150	**275**
220 kV	19	22	210	**350**
400 kV	31	58	300	**730**

Koszt elektroekologiczny budowy nowy linii przesyłowych

Koszt uprawnień, €/t CO_2	Kosz elektroekologiczny tys. €/km		
	110 kV	**220 kV**	**400 kV**
25	6,9 (2 %)	8,7 (1 %)	18,2 (2 %)
50	13,8 (4 %)	17,3 (3 %)	36,4 (3 %)
75	20,7 (6 %)	26,0 (4 %)	54,7 (5 %)
100	27,5 (8 %)	34,7 (5 %)	72,9 (7 %)
Koszt inwestycyjny, mln PLN/km	1,5	3	5

Przykład wykorzystania praktycznego – energetyka WEK-OZE

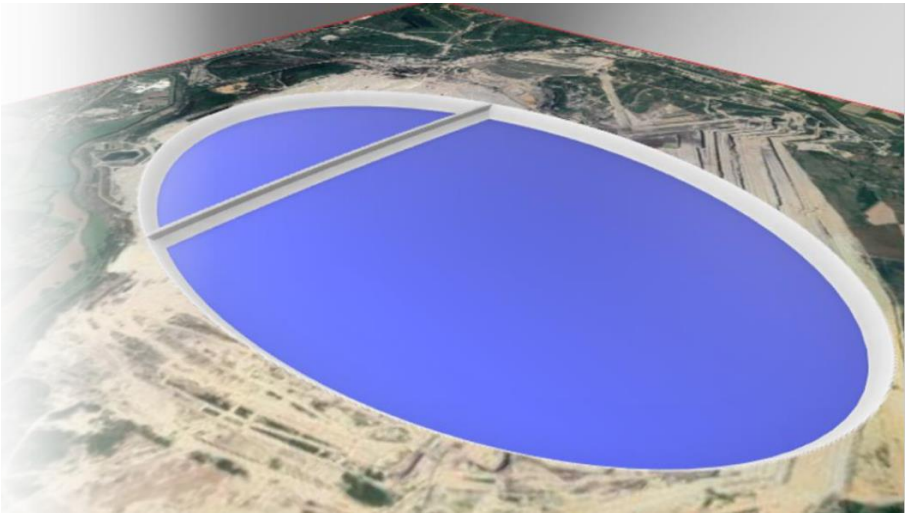
Struktura wytwórcza – propozycja jako alternatywa dla elektrowni Turów

Źródło wytwórcze	Produkcja, GWh	Moc, MW	Czas wykorzystania mocy zainstalowanej, h/rok
Farmy fotowoltaiczne	2277	2100	1084
Elektrownie wiatrowe	2697	1140	2366
Elektrownie na biomasę	480	60	8000
Suma	5455		
Magazyn	**Pojemność, GWh**	**Moc, MW**	
Elektrownie szczytowo-pompowa	165	2300	

Sumaryczna moc 5,6 GW – konieczna rozbudowa linii

Koszt elektroekologiczny związany z budową ESP

Koszt uprawnień, €/t CO_2	Kosz elektroekologiczny mld €
25	1,1 (36 %)
50	2,3 (76 %)
75	3,4 (112 %)
100	4,6 (150 %)



Analiza porównawcza możliwości zastąpienia konwencjonalnych źródeł energii źródłami OZE, na potrzeby transformacji energetycznej w ramach łużyckiego zielonego ładu. Dokument został sporządzony w Instytucie Doradztwa i Analiz dr inż. Karol Pawlak we współpracy z Sustainable Energy Solutions Sp. z o.o., Warszawa 2020

Przykład wykorzystania praktycznego – porównanie śladu CO_2: WEK-WB(Turów); WEK-OZE; Elektroprosumeryzm

Jednostkowy koszt elektroekologiczny WEK-WB (Elektrownia Turów)

Koszt uprawnień, €/t CO_2	Kosz elektroekologiczny €/MWh	
	Bloki 1-6	Blok 7
25	30	25
50	60	50
75	90	75
100	120	100
Ślad CO_2, t CO_2/MWh	**1,2**	**1,0**

Skumulowany ślad CO_2 energetyki WEK-OZE

	Skumulowany ślad CO_2	Roczna produkcja	Skumulowany ślad CO_2	Koszt uprawnień	KEE
	kg CO2/MWh	TWh	kg CO_2/MWh	€/t CO2	€/MWh
PV	40	2,3	**37**	25	0,9
EWL	30	1,1		50	1,9
EB	30	0,5		75	2,8
ESP	42	1,8		100	3,7

Skumulowany ślad CO_2 elektroprosumeryzmu

	Skumulowany ślad CO_2	Roczna produkcja	Skumulowany ślad CO_2	Koszt uprawnień	KEE
	kg CO_2/MWh	TWh	kg CO_2/MWh	€/t CO2	€/MWh
PV	40	240	**35**	25	0,9
mEW	30	30		50	1,9
EWL	30	150		75	2,8
mEB	30	60		100	3,7
EB	30	120			
Akumulatory	44	42			

Przykład wykorzystania praktycznego – koszty uniknięte w elektroprosumeryzmie dla powiatu Zgorzeleckiego i Bogatyni

Szacowane obecne potrzeby energetyczne z podziałem na nośniki energii

	Potrzeby energetyczne, GWh	
	Powiat Zgorzelecki	**Bogatynia**
Energia elektryczna	300	55
Ciepło grzewcze	580	120
CWU	90	20
Paliwa	400	80
Razem	**1370**	**275**

Porównanie szacowanych kosztów energetyki WEK-PK i elektroprosumeryzmu

	Obecnie		Elektroprosumeryzm		Koszty uniknięte w elektroprosumeryzmie, mln PLN/rok
	Potrzeby energetyczne, GWh	Koszt, mln PLN/rok	Potrzeby energetyczne, GWh	Koszt, mln PLN/rok	
Powiat Zgorzelecki	1370	520	600	300	220
Bogatynia	275	100	120	60	40

Podsumowanie i wnioski

1. Przyjęte w analizie założenia uwzględniają aktualne tendencje rozwojowe oraz potrzeby rynków elektroprosumeryzmu. **Pozwalają wyznaczyć potrzebną dynamikę rozwoju poszczególnych technologii OZE oraz zweryfikować możliwości rynków.**

2. Zaproponowany standard metodyczny wyznaczania (szacowania) heurystyki trajektorii redukcji CO_2 pozwala na budowanie heurystyk w **bardzo szerokim zakresie podmiotowym elektroprosumeryzmu**.

3. **Rachunek kosztów krańcowych -** efektywne rozwiązania to takie, które pozwalają na pokrycie lokalnych potrzeb, w jak najkrótszym horyzoncie czasu.

4. **Skumulowany ślad CO_2 w elektroprosumeryzmie**, nie jest wyższy od śladu CO_2 w energetyce WEK-OZE, a ponadto przy uwzględnieniu analizy za pomocą kosztów krańcowych, znacznie szybciej pozwala na osiągnięcie neutralności klimatycznej.