

Modelowanie trajektorii transformacyjnych energetyki do elektroprosumeryzmu w wybranych osłonach kontrolnych

Krzysztof Bodzek

Katedra Energoelektronik Napędu Elektrycznego i Robotyki, Politechnika Śląska

Osiągnięcie neutralności klimatycznej wymaga transformacji całej energetyki w ciągu najbliższych 30 lat. Transformacja ta obejmuje nie tylko sektory energetyczne (WEK-PK), ale wpływa na całkowitą zmianę sposobu użytkowania energii elektrycznej, która w elektroprosumeryzmie (\overline{EP}), ze względu na najwyższą egzergię, jest dominująca (praktycznie jedyna). Obecny stan A(2020) polskiej energetyki jest znany. W dwóch biuletynach PPTe2050 [1], [2] opisano heurystyki napędowe energii elektrycznej OZE po zrealizowaniu transformacji energetycznej ponad podziałami do elektroprosumeryzmu TETIP(A→B) w horyzoncie 2050 – stan B(2050 $\vee\overline{EP}$). W artykule zamodelowano trajektorie transformacyjne wybranych osłon kontrolnych (od sołectwa do kraju) w celu określenia potrzebnej dynamiki zmian zbioru kanonicznych technologii wytwórczych \overline{EP} .

Słowa kluczowe: trajektoria transformacyjna, elektroprosumeryzm, symulacyjna weryfikacja, jednostki samorządu terytorialnego.

1. Wstęp

Na transformację, ogólnie nie tylko energetyki, ma wpływ szereg czynników. Do najważniejszych należą: polityczno-prawne, technologiczne, demograficzne, ekonomiczne i społeczne. W większości są to czynniki, które charakteryzują się losowością, dlatego nawet bardzo precyzyjne modelowanie trajektorii zawsze będzie obarczone niepewnością wynikającą z niemożliwości określenia wszystkich czynników i czasu w których one mogą wystąpić. Zaprezentowane w artykule wyniki należy traktować jedynie jako trajektorie teoretyczne, chociaż wynikające z rzeczywistych danych i przesłanek, które pozwalają na oszacowanie potrzebnej dynamiki zmian poszczególnych technologii wytwórczych w wybranych osłonach kontrolnych. Rzeczywista trajektoria powinna wynikać z działania i potrzeb czterech rynków elektroprosumeryzmu [3].

W artykule przedstawiono charakterystyki dla czterech osłon kontrolnych JST, dla których określona została względna struktura źródeł wytwórczych w stanie B(2050 $\vee\overline{EP}$) [2]. Osłony te powiązane są z zaproponowanym w artykule [1] zakresem autonomizacji systemu KSE, w którym jednym z głównych wskaźników definiujących potrzeby energetyczne jest liczba mieszkańców. Oszacowanie te stanowiły pierwszą iterację pozwalającą powiązać strukturę wytwórczą w osłonach kontrolnych OK(JST) z podziałem administracyjnym Polski. Przedstawione w tabeli 1 wyniki stanowią drugą iterację, opracowaną na podstawie aktualnego podziału administracyjnego i uwzględniającego analizowane w artykule osłony kontrolne.

Należy podkreślić, że osłony OK(JST) nie pokrywają się z obecnym podziałem administracyjnym. Wynika to z nierównomiernego rozłożenia potrzeb energetycznych w kraju. Potrzeby te silnie są związane z województwem, ale najbardziej uwidaczniają się na poziomie gmin i sołectw. Z tego powodu, analizuje się jedną referencyjną osłonę kontrolną dla sołectwa – OK(JST1), którą w kolejnych krokach należy dostosować do lokalnych uwarunkowań. Na drugim biegunie są miasta powyżej 500 tys. mieszkańców. Są one ściśle

związane z osłoną OK(JST6) – oraz OK(JST5), która w artykule nie jest analizowana – i dla których można obliczyć nie tylko względne trajektorie transformacyjne, ale również po przeskalowaniu, bezwzględne (w TWh). W tabeli 1 dodatkowo określono horyzont transformacji, uwzględniony w modelowaniu.

Tab. 1. Charakterystyka osłon kontrolnych OK(JST) w kontekście podziału administracyjnego z wybranymi reprezentatywnymi wskaźnikami elektroprosumeryzmu

	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

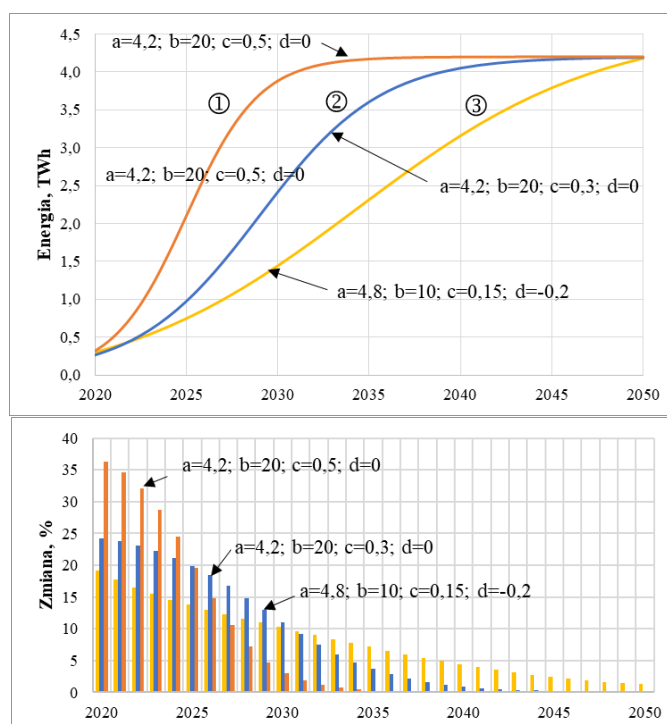
2. Typowe trajektorie transformacyjne

Trajektorie transformacyjne, tu związanych z energetyką WEK i rynkami elektroprosumeryzmu, ale ogólnie badające różne procesy (od rozwoju przedsiębiorstwa do demografii), mogą zostać opisane za pomocą krzywych aproksymujących rzeczywisty przebieg zmian analizowanych obszarów. Zazwyczaj jest to aproksymacja: liniowa, wielomianowa, eksponenta (procent składany) i krzywa logistyczna [4]. Linia jest najprostszą krzywą pozwalającą opisać trend zmian, jednak jest ona zazwyczaj obciążona dużym błędem aproksymacji w szczególności dla procesów długotrwałych. Dlatego, najczęściej wykorzystuje się ją w postaci aproksymacji odcinkowo liniowej, opisywanej w każdym przedziale innymi parametrami. Aproksymacja wielomianowa, pozwala zazwyczaj najdokładniej odwzorować przebieg, w szczególności przy stosowaniu wielomianów wysokiego rzędu, jednak interpretacji fizycznej poszczególnych parametrów jest utrudniona, przez co tworzenie trendu na jej podstawie może być obciążone błędem. Eksponenta (procent składany) dobrze opisuje trajektorie systemów, które są nieskończone, tzn. nie mają ograniczeń w postaci wysycenia rynku. Z tego powodu nadają się do opisu trajektorii na początku procesu, jednak wraz z dochodzeniem do ograniczeń związanych z „pojemnością” rynku mogą być przyczyną dużych błędów w analizach. Funkcja ta ma swoją interpretację fizyczną tzn. współczynnik potęgowy jest to roczna procentowa zmiana (procent składany). Najczęściej spotykaną trajektorią jest krzywa logistyczna (krzywa S) [5]. Krzywą tą pierwotnie zapisano w wyniku obserwacji wzrostu populacji [6], jednak znalazła bardzo szerokie zastosowanie w analizowaniu dynamiki zmian w naukach przyrodniczych, ekonomicznych a także medycynie. Równanie krzywej logistycznej w odniesieniu transformacji energetycznej można zapisać w postaci:

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

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

W artykule do określenia trajektorii transformacyjnej, wykorzystuje się krzywą logistyczną, przyjmując za zmienną t lata liczone od rozpoczęcia analizowanego okresu ($t = 1, 2, 3, \dots$). W zależności od parametrów, kształt krzywej logistycznej zmienia się (rys. 1). Pozwala to odwzorować przewidywaną trajektorię transformacyjną w zależności od komercjalizacji technologii i potrzeb rynku. Mianowicie: krzywa 1 na rys. 1 – charakterystyczna jest dla technologii, które są już w pełni skomercjalizowane, łatwo dostępne (efekt fabryczny) oraz istnieje na nie duże zapotrzebowanie; krzywa 2 na rys. 1 – jest charakterystyczna dla technologii dojrzałych, które już istnieją na rynku, ale w dalszym ciągu jest na nie duże zapotrzebowanie; krzywa 3 na rys. 1 – charakterystyczna jest dla technologii we wczesnej fazie rozwoju (o wysokim nakładzie inwestycyjnym). W zależności od parametrów, w szczególności tempa transformacji (parametr c) zmieniają się również roczne przyrosty w tym przypadku energii. Im współczynnik c jest większy tym tempo transformacji, osiągnięcie wartości oczekiwanej, jest większe.



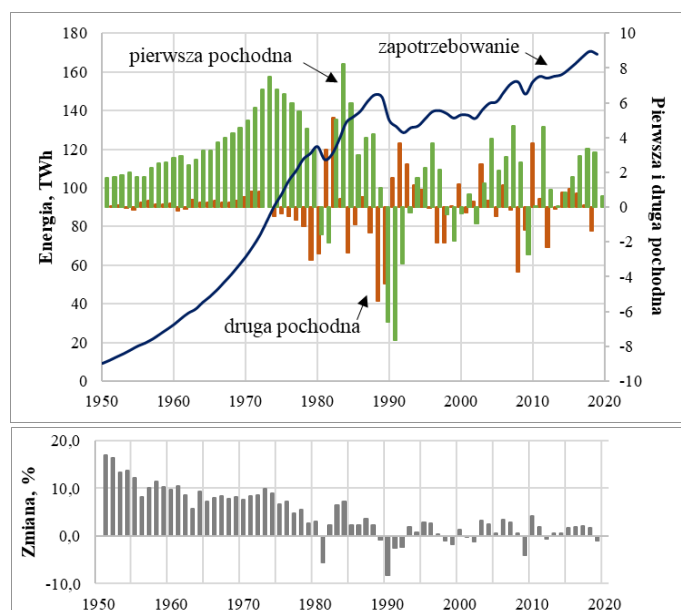
Rys. 1. Wpływ parametrów krzywej logistycznej na trajektorie transformacyjne oraz roczną zmianę procentową (przyrost)

3. Aproksymacja zapotrzebowania Polski

Zapotrzebowanie w systemie KSE w latach od 1950 do 2019 [7] zaprezentowano na rys. 2. Można zauważyć, że na zapotrzebowanie to istotny wpływ miała sytuacja polityczna w Polsce. Analiza pokazuje, że możemy rozróżnić dwa przedziały czasowe o zupełnie innych właściwościach. Pierwszy to okres socjalizmu, z „dynamicznie” rozwijającą się gospodarką w którym swoje piętno odcisnął stan wojenny. Drugi to znacznie mniej uporządkowany okres, z początkowym gwałtownym spadkiem zapotrzebowania, aż do roku 1993, i znacznie mniej uporządkowany, bo podlegający częściowo wpływowi rynku, okres wolnego wzrostu zapotrzebowania. W analizie krzywej zapotrzebowania pomagają pierwsza i druga pochodna.

Pierwszą pochodną można interpretować jako roczną zmianę mocy w wartościach bezwzględnych (jednostka to TWh/r). Natomiast drugą pochodną określa wypukłość funkcji, w tym przypadku tendencję utrzymania wzrostu (w przypadku dodatniej wartości) oraz tendencję do stagnacji, wysycenia się rynku (w przypadku ujemnych wartości). Wartość drugiej pochodnej można również interpretować jako 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 stabilny. Taki charakter miał pierwszy okres rozwoju elektroenergetyki w Polsce (do roku 1981). Jednak nawet już ten okres nie można opisać za pomocą jednej funkcji eksponencjalnej, ze względu na wystąpienie przegięcia (rok 1973) w zapotrzebowaniu. Właściwsza jest krzywa logistyczna.

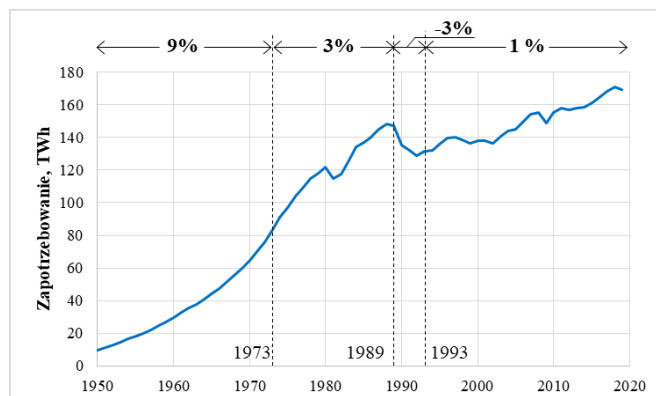
Na rys. 1 zamieszczono również procentową zmianę zapotrzebowania liczoną rok do roku. Wykres ten może być jednak mylący, ponieważ w każdym roku, zmienia się punkt odniesienia (wynika z zapotrzebowania w poprzednim roku). Jeżeli analizowana technologia jest nowa w początkowym okresie zmiany procentowe mogą sięgać 1000% i więcej. Procentowa zmiana może być więc wykorzystywane w przypadku, gdy analizuje się technologię, już obecną na rynku. Chociaż może być ona w początkowym okresie rozwoju. Należy podkreślić, że początki polskiej energetyki przypadają na koniec XIX wieku, dlatego zmiany procentowe zapotrzebowania Polski w latach 50. ubiegłego wieku nie przekraczają 20%.



Rys. 2. Odzworowanie zapotrzebowania KSE

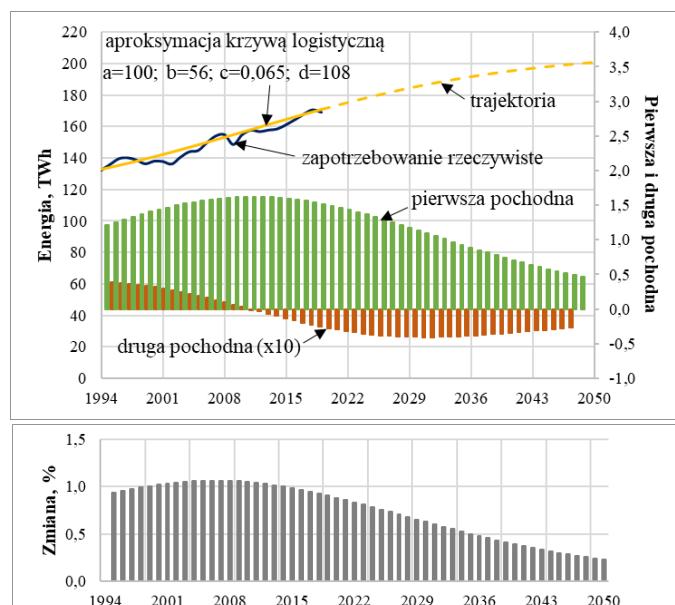
W rozwoju elektroenergetyki, rozumianym tutaj jako zmiana zapotrzebowania na energię elektryczną, można wyodrębnić cztery charakterystyczne okresy, dla których, na podstawie aproksymacji eksponentą, obliczono procentową zmianę (procent składany) wartości zapotrzebowania. Zostały one wybrane na podstawie analizy pierwszej i drugiej pochodnej (rys. 2). Obliczone wartości, wraz z zaznaczonymi przedziałami zamieszczono na rys. 3. Końcowy okres od 1993 roku charakteryzuje się rocznym przyrostem zapotrzebowania na poziomie 1% i może on zostać aproksymowany funkcją eksponencjalną. Jednak do dalszej

analizy właściwsza będzie krzywa logistyczna, ze względu na heurystykę potrzeb energetycznych na rynkach elektroprosumeryzmu w stanie $B(2050\sqrt{EP})$ [3].



Rys. 3. Zmiana zapotrzebowania (procent składany) obliczony na podstawie odcinkowej aproksymacji funkcją eksponencjalną

Rzeczywiste zapotrzebowanie po roku 1993 stanowi początek okresu, dla którego określa się trajektorię transformacyjną, kończącą się potrzebami energetycznymi wynoszącymi 200 TWh w roku 2050. Oczywiście trajektoria nie uwzględnia wystąpienia krytycznych czynników wpływających na zmianę zapotrzebowania (np. politycznych) jednak pozwala prognozować trend zmian i należy traktować je jako pierwszą iterację trajektorii transformacyjnej.



Rys. 4. Wyznaczenie trajektorii zapotrzebowania w horyzoncie 2050 za pomocą aproksymacji zapotrzebowania krzywą logistyczną

Pełna analiza wymaga wyznaczenia trajektorii związanej z czterema rynkami elektroprosumeryzmu, a w szczególności pasywizacją budownictwa, elektryfikacją ciepłownictwa oraz transportu. Zostały one w analizie uwzględnione jedynie w sposób jakościowy a nie ilościowy oraz przy założeniu, że znana jest końcowa wartość zapotrzebowania. Wyznaczenie każdej z tych trajektorii wymaga odrębnej pogłębionej

analizy. Dla przykładu podstawą zmiany obecnego sposobu użytkowania energii elektrycznej powinien być audyt energetyczny [8].

Na podstawie analizy pierwszej i drugiej pochodnej (rys. 4), można zauważyć, że w roku 2013 wystąpił punkt przegięcia, tzn. od tego roku wzrost zapotrzebowania ma tendencję spadkową, która nie uwidoczniła się przy analizie zapotrzebowania rzeczywistego (rys. 2). Aproksymacja „wytłumiła” roczne wahania rynku i pozwoliła na określenie trendu.

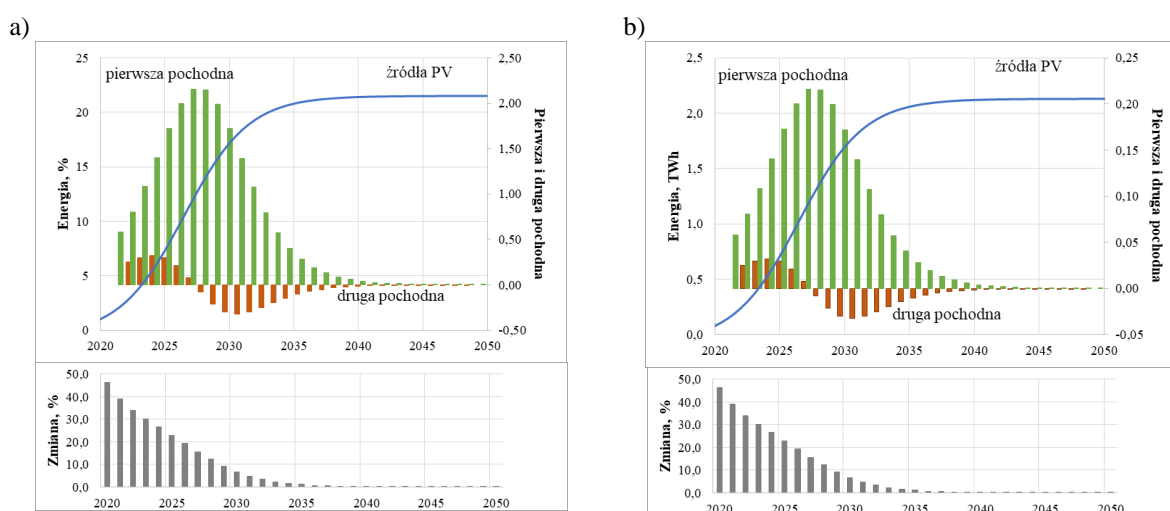
4. Krzywe transformacyjne na przykładzie osłony OK(JST6) – Warszawa

W artykule [2] została określona struktura źródeł wytwórczych dla wybranych osłon OK(JST). Wyniki analizy stanowią punkt końcowy krzywej transformacyjnej (tab. 2).

Tab. 2. Struktura źródeł wytwórczych dla wybranych osłon OK(JST) [2]

	Osłona Kontrolna			
	OK(JST1)	OK(JST2)	OK(JST3)	OK(JST6)
	Względna produkcja energii E^* , %			
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

Obliczenie krzywych transformacyjnych można wykonać dla wartości względnych – procentowych – (rys. 5a) lub energii (rys. 5b). Do skalowania wartości względnych (tab. 2) wykorzystuje się roczne zapotrzebowanie wybranej osłony kontrolnej.



Rys. 5. Trajektoria transformacyjna źródeł PV a) jednostki względne, b) energia, dla OK(JST6) - Warszawa

W obydwóch przypadkach kształt trajektorii oraz kształt pierwszej i drugiej pochodnej nie zmieniają się, jednak inna jest ich interpretacja. W przypadku wartości względnych (rys. 5a), pochodną należy interpretować jako punkty procentowe rocznej zmiany energii względnej, natomiast w przypadku energii (rys. 5b) jako jej (tej energii) roczną zmianę. Interpretacja drugiej pochodnej pozostaje bez zmian. W obydwóch przypadkach zmiana procentowa, ze względu na jej względny charakter również pozostaje taka sama.

Należy podkreślić, że osłonę OK(JST6) można bezpośrednio przeliczyć na trajektorię miast powyżej 500 tys. mieszkańców. W obrębie tych miast nie ma innych osłon kontrolnych OK(JST), tzn. należy ją traktować jako osłonę rzeczywistą, uwzględniającą wszystkie podmioty w pięciu największych miastach. Zapotrzebowanie w stanie $B(2050\sqrt{EP})$ dla wszystkich miast powyżej 500 tys. mieszkańców wynosi 21 TWh. Dlatego analiza trajektorii transformacyjnej na podstawie struktury wytwórczej dla OK(JST6) została wykonana dla zapotrzebowania zgodnego z odpowiadającym mu podziałem administracyjnym.

Inaczej jest w przypadku osłon dla sołectw OK(JST1), gmin OK(JST2) oraz miast do 100 tys. mieszkańców OK(JST3), w których podział administracyjny nie nakłada się na podział potrzeb energetycznych, chociaż jest z nim związany, a dodatkowo potrzeby energetyczne poszczególnych jednostek terytorialnych znacznie się od siebie różnią. Z tego powodu analiza osłon OK(JST1) do OK(JST3) została wykonana dla wartości względnych, które mogą być następnie łatwo przeskalowane dla rzeczywistego charakteru wybranej osłony OK(JST).

W analizie rozpatruje się krzywe transformacyjne dla siedmiu technologii, dobór parametrów krzywej logistycznej dla każdej technologii uwzględniał stan początkowy (rok 2019), aktualny stan rozwoju technologii, koszt technologii, obecną tendencję w instalacji źródeł, potrzebę wdrożenia, oraz końcową wartość w horyzoncie transformacji dla każdej osłony kontrolnej (tab. 1). Dobór parametrów dla każdej technologii definiował jej trajektorię i zależał w szczególności od:

- źródła PV – technologia skomercjalizowana, już obecnie 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,
- 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

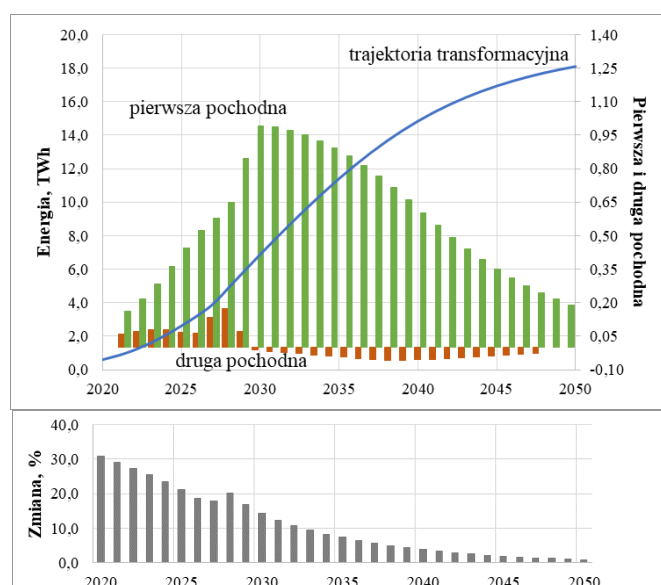
i krótkim czasem zwrotu inwestycji. Założono szybki wzrost i stosunkowo szybkie osiągnięcie wartości docelowej ze względu na ograniczoną dostępność odpadów,

- elektrownie offshore – założono, że pierwsze morskie elektrownie wiatrowe powstaną dopiero w roku 2027 [9]. Po tym okresie ich rozwój będzie szybki [9].

Antycypowane w artykule trajektorie transformacyjne, nie uwzględniają wielu czynników które na bieżąco (w miarę ich identyfikacji) powinny zostać uwzględniane w modelowaniu. Duży wpływ na trajektorie będzie miał rozwój technologii, warunki polityczno-prawne, ale w szczególności będą one rozwijać się w reakcji na potrzeby czterech rynków elektroprosumeryzmu.

5. Trajektorie transformacyjne dla miast powyżej 500 tys. mieszkańców

Pięć miast o liczbie mieszkańców przekraczających 500 tys. zostały wybrane do analizy trajektorii transformacyjnej produkcji energii (w TWh). Potrzeby tych miast pokrywają się ze strukturą wytwórczą dla OK(JST6), dlatego została ona wybrana jako struktura referencyjna. Struktura ta, jest również właściwa dla Górnośląsko Zagłębiowskiej Metropolii czy Trójmiasta a zaprezentowany sposób modelowania można wykorzystać przy określeniu ich trajektorii transformacyjnych. Wymagane jest przeskalowanie bazujące na potrzebach energetycznych (energii elektrycznej) w elektroprosumeryzmie. Trajektorie transformacyjne sześciu analizowanych technologii, wraz z pochodnymi i roczną procentową zmianą energii zamieszczono w załączniku 1. Na ich podstawie została obliczona sumaryczna trajektoria transformacyjna źródeł OZE, czyli krzywa osiągnięcia elektroprosumeryzmu (rys. 6). W analizowanym okresie sumaryczne roczne przyrosty energii nie przekraczają 30 %. Należy jednak podkreślić, że wynikają one w dużej mierze ze wzrostu produkcji energii w źródłach PV, które charakteryzują się obecnie bardzo dużą dynamiką wzrostu, większą nawet niż w analizowanych trajektoriach transformacyjnych. Mniejsze wartości wzrostu wynikają z aproksymacji 30 letniego okresu transformacji.



Rys. 6. Trajektoria transformacyjna źródeł OZE dla miast powyżej 500 tys. mieszkańców

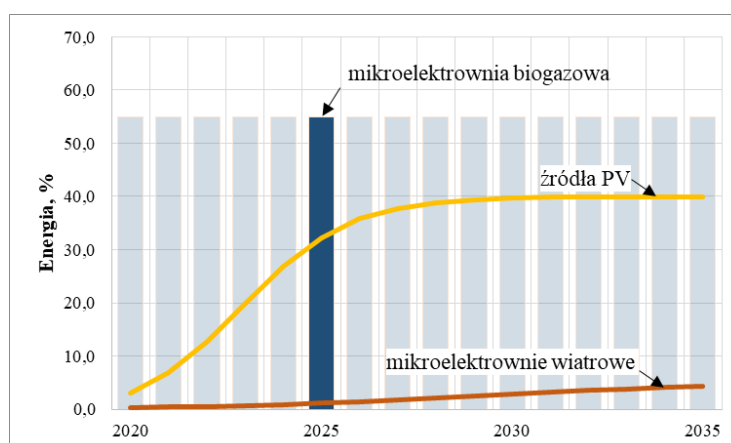
Wartość końcowa produkcji energii jest niższa w porównaniu do tej z tabeli 1. Jest to spowodowane nie uwzględnieniem w analizie technologii gazowych (bloki combi) oraz paliw ropopochodnych (UGZ), które występują w strukturze wytwórczej OK(JST6) [2]. Rozwój technologii magazynowych oraz potencjalnie technologii wodorowych, może wpłynąć na zmianę struktury bilansu wytwórczego, dlatego jest duże prawdopodobieństwo (szansa), że w stanie B(2050 \vec{VEP}) nie będą one potrzebne.

6. Krzywe transformacyjne dla osłon na obszarach wiejsko-miejskich OK(JST1) do OK(JST3)

Osłon kontrolne dla obszarów wiejsko-miejskich nie mogą być powiązane bezpośrednio z podziałem administracyjnym, ze względu na znaczne różnice pomiędzy poszczególnymi sołectwami, zarówno pod względem zapotrzebowania jak i np. dostępności do surowców dla mikroelektrowni biogazowej. Dlatego analiza prowadzona była dla wartości względnych struktury bilansu wytwórczego (tab. 2).

Ośłona OK(JST1)

W osłonie OK(JST1) możliwe jest wyznaczenie trajektorii dla źródeł PV (moc jednostkowa 2 do 10 kW) oraz mikroelektrowni wiatrowych (o podobnej mocy). Natomiast w osłonie tej jest miejsce jedynie dla pojedynczej mikroelektrowni biogazowej (moc 10 do 50 kW). Czas, w którym zostanie ona oddana do użytku powinien znajdować się w horyzoncie osiągnięcia elektroprosumeryzmu (do roku 2035). Należy jednak podkreślić, że wybudowanie mikroelektrowni biogazowej, zaznaczone symbolicznie na rysunku 7, spowoduje, że osłona ta praktycznie może stać się osłoną off-grid (off system) ze źródłem regulacyjno-bilansującym. Jednak osiągnięcie elektroprosumeryzmu będzie wymagało zmiany sposobu użytkowania energii elektrycznej. Zmiana ta może zostać osiągnięta poprzez urządzenia i usługi rynków elektroprosumeryzmu.

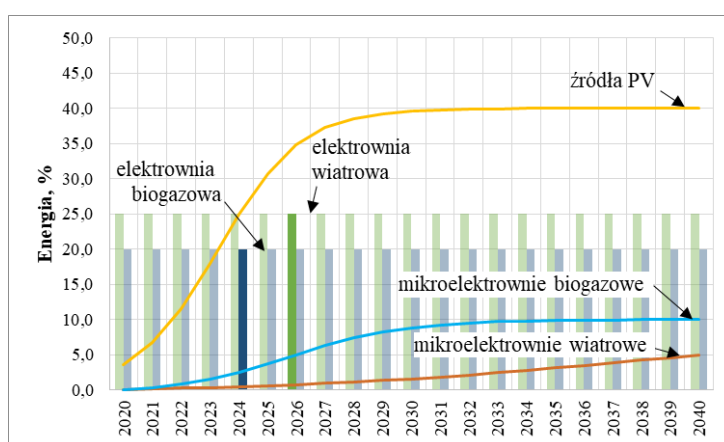


Rys. 7. Względna trajektoria transformacyjna źródeł OZE, mikroelektrowni wiatrowych oraz potencjał budowy mikroelektrowni biogazowych dla OK(JST1)

Ośłona OK(JST2)

W ośłonie OK(JST2), w zależności od wielkości gminy może być potrzebne kilka mikroelektrowni biogazowych. Możliwe jest więc obliczenie trajektorii transformacyjnej dla tej technologii. W OK(JST2) znajduje się jedynie sieć nN i SN, dlatego zakłada się wykorzystanie pojedynczych elektrowni wiatrowych (moc rzędu 3 MW) i pojedynczych elektrowni biogazowych (klasy 1 MW). Z tego powodu technologii te nie mają wyznaczonej krzywej transformacyjnej, a jedynie zaproponowano czas w którym powinno nastąpić oddanie ich do użytku.

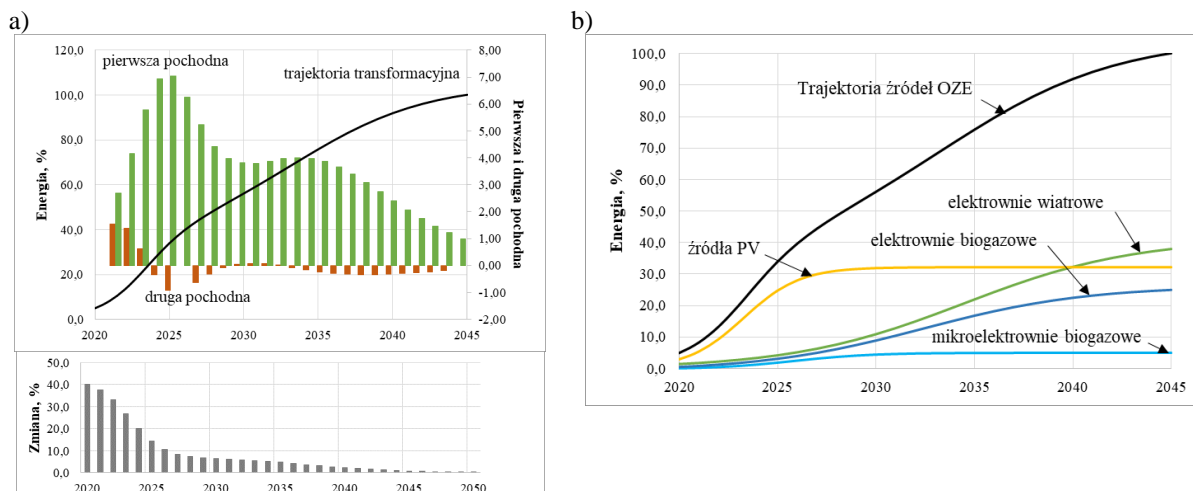
Ośłona OK(JST2) ma potencjał osiągnięcia elektroprosumeryzmu w ciągu najbliższych 20 lat. Jest to możliwe, ze względu na małą gęstość mocy oraz łatwy dostęp do lokalnych zasobów energetycznych, w tym do surowców dla elektrowni biogazowej.



Rys. 8. Względna trajektoria transformacyjna źródeł OZE, mikroelektrowni wiatrowych i biogazowych oraz potencjał budowy elektrowni biogazowych i wiatrowych dla OK(JST2)

Ośłona OK(JST3)

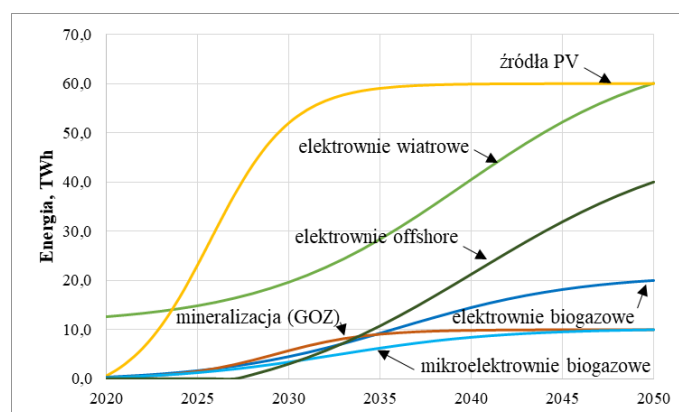
Ośłona OK(JST3) powiązana jest z miastem 50 tys. do 100 tys. mieszkańców (oraz z powiatem jeżeli istnieje). Charakteryzuje się stosunkowo dużymi potrzebami energetycznymi. Dla przykładu roczne zapotrzebowanie klastra ORE[10] wynosi około 90 GWh a docelowe, obejmujące cały powiat szacowane jest na 180 GWh. W ośłonie tej potrzeby energetyczną są znacznie większe dlatego trajektorie transformacyjne obejmuje zbiór kanonicznych technologii wytwórczych. Sumowanie (dla każdego roku) wszystkich trajektorii pozwoliło na obliczenie trajektorii transformacyjnej źródeł OZE (rys. 9) oraz analizę tej trajektorii za pomocą pochodnych oraz rocznej zmiany procentowej. Na podstawie wyników analizy (rys. 9) można zauważyć, że trajektoria ta ma trzy punkty przegięcia. Pierwszy (rok 2025), spowodowany jest spowolnieniem przyrostu mocy w źródłach PV, drugi (rok 2030) wynika ze zwiększenia dynamiki instalacji źródeł wiatrowych, natomiast trzeci (rok 2034) z konieczności ograniczenia inwestycji ze względu na zbliżanie się do pełnego pokrycia potrzeb energetycznych za pomocą zbioru technologii OZE. Duże zmiany procentowe w pierwszym okresie wynikają z dużej dynamiki instalacji źródeł PV, w późniejszym okresie (po roku 2025) nie przekraczają 10 %. Taka dynamika zmian jest charakterystyczna dla „dojrzałego” rynku



Rys. 9. Trajektoria transformacyjna a) źródeł OZE z pierwszą i drugą pochodną oraz roczną zmianą procentową; b) poszczególnych technologii w osłonie OK(JST3).

7. Krzywe transformacyjne dla Polski

Stan $B(2050\overline{VEP})$ został określony na podstawie struktury miks energetycznego zaproponowanego w [1], który przeskalowano dla energii wynoszącej 200 TWh. Efektem analizy są krzywe transformacyjne dla poszczególnych technologii zamieszczone na rys. 10 oraz w załączniku 2, uwzględniające uwarunkowania z punktu 4. Trajektorie dotyczą zbioru kanonicznych technologii wytwórczych. Nie uwzględnia się innych technologii, np. elektrowni wodnych, których potencjał rozwoju jest znikomy i nie zmieniają one w sposób istotny struktury wytwórczej.

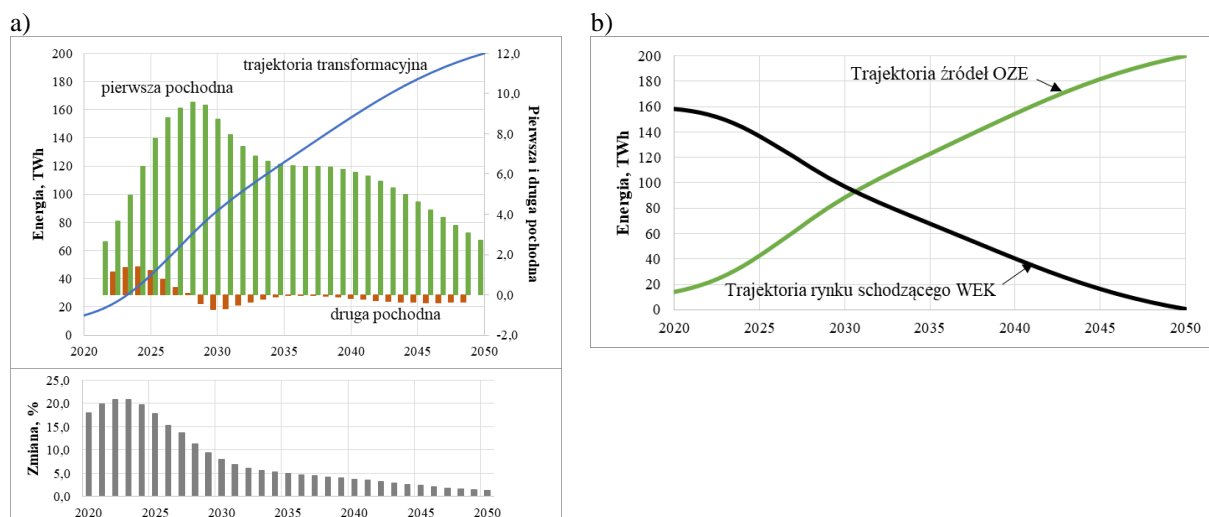


Rys. 10 Trajektoria transformacyjne źródeł OZE

Trajektoria transformacyjną (rys. 11a) obliczono sumując trajektorie dla poszczególnych źródeł. Uzyskano w ten sposób pierwszą iterację inwestycji w źródła OZE, potrzebnych do osiągnięcia neutralności klimatycznej w horyzoncie 2050. Z przeprowadzonych badań wynika, że w pierwszym okresie potrzebną są duże inwestycje w źródła (w szczególności źródła PV), które w szczytowym okresie około roku 2027 powinny zwiększyć produkcję energii o blisko 4 TWh. Co stanowi przyrost energii na poziomie 20 % rok do roku. Na tak duże przyrosty energii, składa się szereg technologii wytwórczych, w tym również elektrownie wiatrowe offshore.

Krytyczne ze względu na utrzymanie dynamiki transformacji jest pierwsze 10 lat (do roku 2030), z dynamiką zmian wynoszącą około 20 % rocznie. Należy jednak pamiętać, że rozwój ten dotyczy głównie źródeł PV, które charakteryzowały się przyrostem mocy zainstalowanej (ale również produkowanej energii) 140% w roku 2019. Po roku 2030 roczny procentowy przyrost mocy nie przekracza 10 %.

Zaproponowane trajektorie uwzględniają gwałtowny przyrost źródeł PV, należy jednak traktować je, jedynie jako trend. Rzeczywista trajektoria powinna wynikać z potrzeb rynków elektroprosumeryzmu. W takiej sytuacji, będzie obciążona najmniejszym ryzykiem nietrafionych inwestycji.



Rys. 11. Trajektoria transformacyjna a) źródeł OZE; b) rynku schodzącego WEK

Na podstawie obliczonej trajektorii potrzeb energetycznych (rys. 4) oraz trajektorii transformacyjnej źródeł OZE (rys. 11a) obliczono trajektorię rynku schodzącego (rys. 11b). Odejście od paliw kopalnych (redukcja runku schodzącego WEK) uzyskane na podstawie założeń analizy przeprowadzonej w artykule, pokazuje, że w około roku 2030 udział wschodzących rynków elektroprosumeryzmu może przekroczyć 50 %, stając się dominującym sposobem wytwarzania energii w polskiej energetyce.

8. Podsumowanie

Przyjęte w analizie założenia uwzględniają aktualne tendencje rozwojowe oraz potrzeby rynków elektroprosumeryzmu. Pozwalają wyznaczyć potrzebną dynamikę rozwoju poszczególnych technologii OZE, należy je jednak traktować jako pierwsze przybliżenie. W szczególności pogłębionej analizie wymagają zagadnienia związane z rozwojem rynków elektroprosumeryzmu, mianowicie: pasywizacji budownictwa, elektryfikacji ciepłownictwa i transportu. Obszary te, w istotny sposób będą wpływały na krzywe transformacyjne i należy je uwzględniać w kolejnych iteracjach (przybliżeniach) trajektorii.

Dalszy etap badań związany jest z określeniem potrzebnych kosztów transformacyjnych, uwzględniających zwiększenie mocy zainstalowanej, ale również konieczność wdrożenia technologii ICT, pozwalających na zmianę sposobu użytkowania energii elektrycznej.

PIŚMIENNICTWO

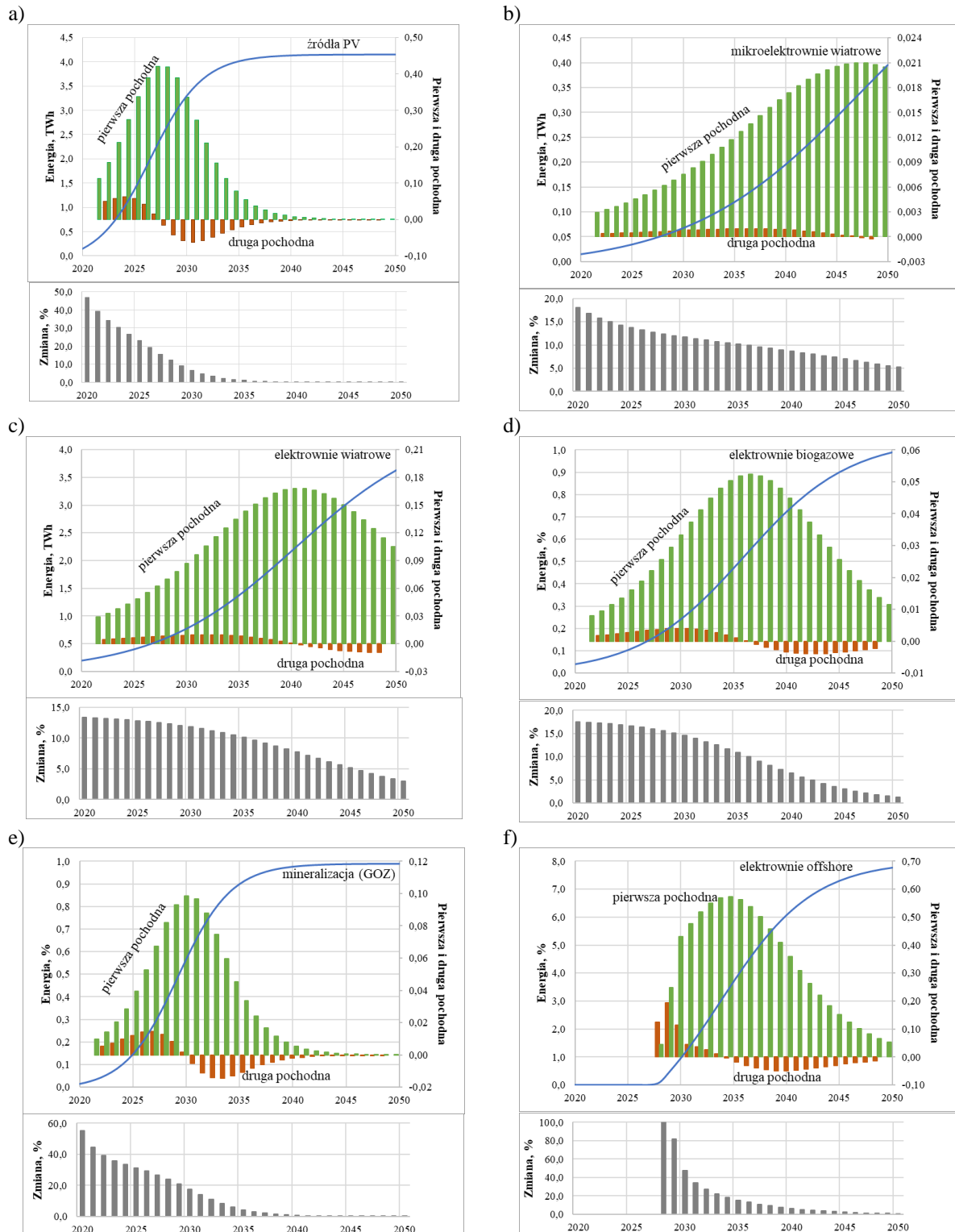
- [1] Popczyk J. *Trzy fale elektroprosumeryzmu*. Biuletyn PPTE2050 Nr 2/2020. Energetyka 7/2020 (także <https://ppte2050.pl>)
- [2] Bodzek K.: *Od analizy profili na osłonach kontrolnych systemu (WSE) do wskazówek projektowania struktury miksu energetycznego – studium przypadków*. Biuletyn PPTE2050 Nr 2/2020. Energetyka 7/2020 (także <https://ppte2050.pl>)
- [3] Popczyk J.: *Cztery rynki elektroprosumeryzmu*. Biuletyn Rynki Elektroprosumeryzmu Nr 1/2020. Energetyka 11/2020 (także <https://ppte2050.pl>)
- [4] Lichota A. *Prognozowanie krótkoterminowe na lokalnym rynku energii elektrycznej*. Rozprawa doktorska, Wydział Zarządzania, AGH, Kraków 2006
- [5] Słupiński M.: *Prognozowanie w okresie wydłużonym z wykorzystaniem krzywej S w odniesieniu do wyników projektu „Quality of Life”*. Zeszyty naukowe Wyższej szkoły Bankowej we Wrocławiu, Nr 3(35)/2013
- [6] Malthus T.R.: *An essay on the principle of population*. London: J. Johnson, London 1798
- [7] Strona internetowa PSE.: <https://www.pse.pl/>
- [8] Słupik T.: *Audyt energetyczny w elektroenergetyce, przemyśle i gospodarce komunalnej jako narzędzie diagnostyczne w dążeniu do elektroprosumeryzmu*. Biuletyn Rynki Elektroprosumeryzmu Nr 1/2020. Energetyka 11/2020
- [9] Materiały firmy Equinor, Konwersatorium Inteligentna Energetyka Grudzień 2019: https://ppte2050.pl/platforma/apbp/konwers/index_d.php?ev_id=3
- [10] Popczyk J., Bodzek K., Grześkowiak J.: *Wirtualny minisystem elektroenergetyczny. Wielkopolska Południowa.*: <https://www.cire.pl> <https://ppte2050.pl/>

Wersja alpha artykułu.

Artykuł zostanie opublikowany w Biuletynie Rynki Elektroprosumeryzmu Nr 1/2020. Energetyka 11/2020

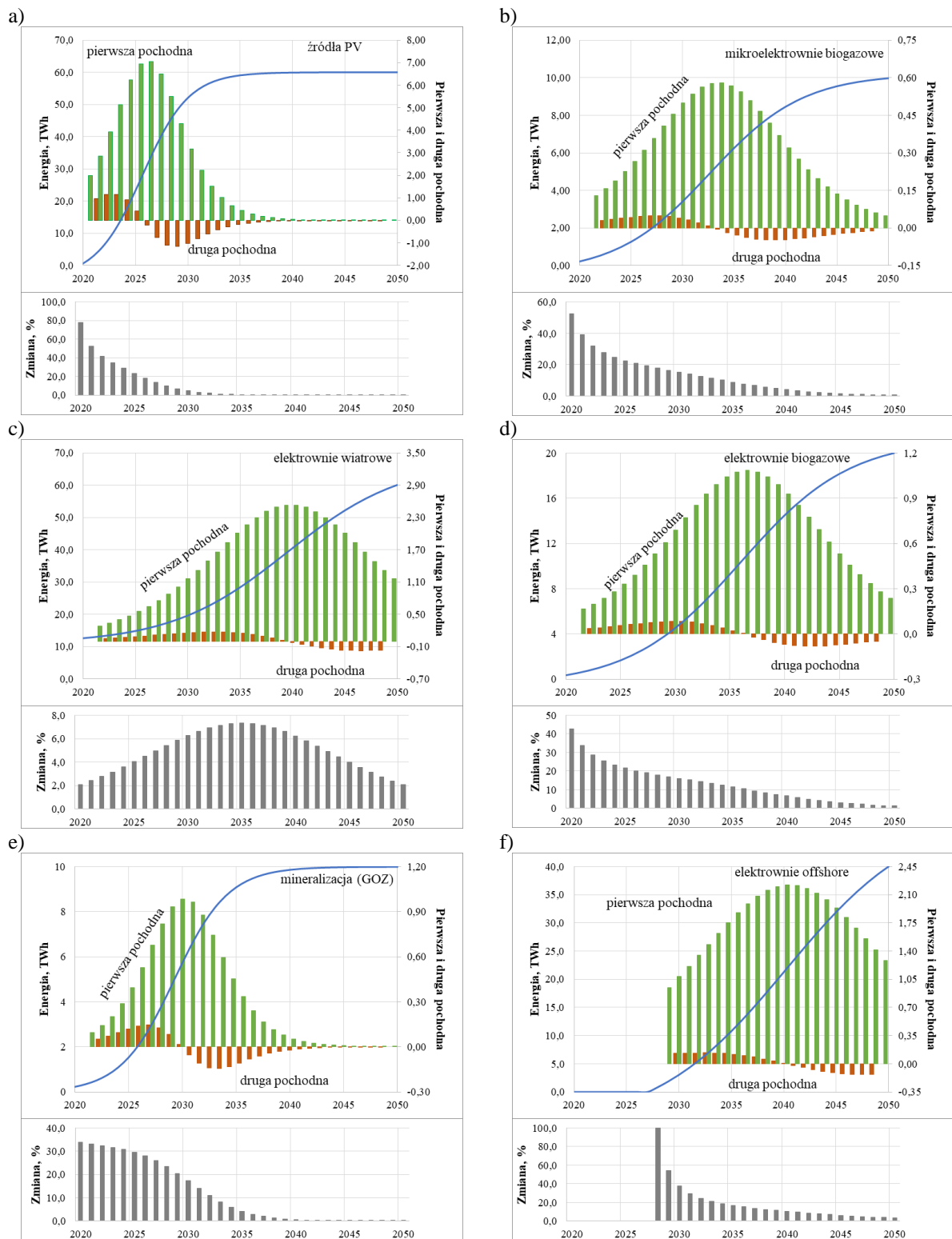
Załącznik 1.

Trajektorie transformacyjne źródeł OZE dla miast powyżej 500 tys. mieszkańców



Rys. 12. Trajektoria transformacyjna a) źródeł PV, b) mikroelektrowni wiatrowych, c) elektrowni wiatrowych, d) elektrowni biogazowych, e) mineralizacji (GOZ), f) elektrowni offshore, dla miast powyżej 500 tys. mieszkańców

Załącznik 2.
Trajektorie transformacyjne źródeł OZE dla Polski



Rys. 13. Trajektorie transformacyjne a) źródeł PV, b) mikroelektrownie wiatrowych, c) elektrowni wiatrowych, d) elektrowni biogazowych, e) mineralizacji (GOZ), f) elektrowni offshore dla Polski