Prof. dr hab. inż. Jan Popczyk
Przewodniczący Sekcji nowych Koncepcji i Technologii Energetycznych
(w organizacji)

TRANSFORMACJA ENERGETYKI
paradygmatyczny triplet i mapa oraz trajektoria[1]

Streszczenie: *Transformacja współczesnej energetyki paliw kopalnych w monizm elektryczny (2050) oznacza szokową zmianę bilansów energetycznych (w artykule przedstawia się dla ilustracji charakterystyczny bilans dla domu jednorodzinnego w Polsce, dla Polski i dla świata). Analiza fundamentalnych podstaw tych zmian (termodynamicznych, elektroenergetycznych, ekonomicznych i społecznych) pozwala sformułować paradygmaty rozwojowe nowej energetyki: prosumencki, egzergetyczny i wirtualizacyjny (ostatni w odniesieniu do elektroenergetyki). Jest to triplet, który ułatwia zaproponowanie nowej architektury rynku energii elektrycznej oraz tworzy możliwość racjonalizacji trajektorii transformacyjnej (2018-2050) za pomocą mechanizmów rynkowych.*

TRANSFORMATION OF THE ENERGY INDUSTRY
paradigmatic triplet, map and trajectory

Abstract: *Transformation of the energy market, based on of fossil fuels, into electric monism (2050) means a shock change in energy balance (to illustrate this the article presents an example of a characteristic balances for a single-family home in Poland, for Poland and for the world). The analysis of the fundamental foundations of these changes (thermodynamic, electric, economic and social) allows to formulate the following development paradigms of the new energy issues: prosumers, exergy and virtualization (the last one in relation to power industry). It is a triplet that facilitates the proposal of new architecture of the electricity market and creates the opportunity to rationalize the transformation trajectory (2018-2050) by means of market mechanisms.*

Tylko nowe koncepcje, zrealizowane za pomocą nowych technologii, mają szanse stać się współcześnie innowacją przełomową, niezbędnie potrzebną energetyce.

Jedno pojęcie, trzy paradygmaty metodyczne, trzy akronimy identyfikujące środowisko transformacji energetycznej i trzy rynki energii elektrycznej nadające jej dynamikę

Popytowy monizm elektryczny wszystkich potrzeb energetycznych jest ważny ze względu na jego fundamentalne znaczenie związane bezpośrednio z praktycznym pojęciem energii użytecznej. Tryplet paradygmatyczny stanowi punkt wyjścia do konsolidacji metody nowej energetyki (paradygmaty: prosumencki, egzergetyczny i wirtualizacyjny). Trzy akronimy – EP (energetyka prosumencka), NI (segment niezależnych inwestorów), WEK (wielkoskalowa energetyka korporacyjna) – określają mapę podmiotową stanu początkowego transformacji energetycznej (stan A). Trzy rynki energii elektrycznej – wschodzące rynki (1) i (2) vs rynek schodzący (WEK) – mają z kolei znaczenie, które wynika z faktu, że determinują bezpośrednio dynamikę trajektorii transformacyjnej energetyki w horyzoncie 2050 (stan B).

[1] Artykułu została opublikowany (bez cz. III) w *Śląskich Wiadomościach Elektrycznych 5'2018*. W całości został opublikowany w wydawnictwie okolicznościowym SEP: 65 lat Oddziału Gliwickiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich 1953-2018. Gliwice 2018. W pierwszych miesiącach 2019 r. przewidziana jest aktualizacja edytorska artykułu (do standardów PPTE).

Tab. 1. Popytowy monizm elektryczny i energia użyteczna, paradygmatyczny tryplet, 3 akronimy identyfikujące środowisko transformacji energetycznej i 3 rynki determinujące jej dynamikę

Popytowy monizm elektryczny i energia użyteczna (E_u)	Energia elektryczna OZE potrzebna do zaspokojenia potrzeb energetycznych, po przeprowadzeniu pasywizacji budownictwa, po elektryfikacji usług ciepłowniczych (za pomocą pompy ciepła), po elektryfikacji transportu (za pomocą samochodu elektrycznego), i po wykorzystaniu istniejącego jeszcze potencjału poprawy efektywności użytkowania energii elektrycznej (w dotychczasowym, tradycyjnym zakresie.
Paradygmat prosumencki	Paradygmat efektu prosumenckiego łańcucha wartości, wzmacnianego przez efekt fabryczny (skalowalności), zastępującego efekt skali WEK
Paradygmat egzergetyczny	Paradygmat zwalczania wielkich strat egzergii chemicznej i jądrowej za pomocą wysokoegzergetycznej energii elektrycznej ze źródeł OZE (i wykorzystania egzergii surowców nieenergetycznych w pasywizacji budownictwa oraz strat egzergii źródła dolnego pompy ciepła napędzanej energią elektryczną).
Paradygmat wirtualizacyjny	Paradygmat współużytkowania sieci elektroenergetycznych (paradygmat zasady TPA+ pozwalającej na intensyfikację wykorzystania sieci za pomocą konkurencji na rynku energii elektrycznej w przestrzeni ograniczeń sieciowych zarządzanych przez inteligentne sieciowe terminale dostępowe).
Energetyka EP	Energetyka prosumencka (w Polsce od „Kowalskiego" po KGHM)
Energetyka NI	Energetyka niezależnych inwestorów (źródeł OZE, efektywności energetycznej strony popytowej, inteligentnej infrastruktury)
Energetyka WEK	Wielkoskalowa energetyka korporacyjna (paliw kopalnych)
Schodzący rynek energii elektrycznej (WEK)	Rynek polski o wyjściowym stanie A (2020) ukształtowanym przez zasadę TPA (w ramach reform elektroenergetyki zapoczątkowanych na świecie na przełomie lat 1980. i 1990.) oraz „zerowym" końcowym stanie B (2050).
Wschodzący rynek energii elektrycznej (1)	Rynek polski o stanie A bliskim „zerowemu", rozwijający się na infrastrukturze sieciowej nN-SN, właściwy energetyce EP-NI.
Wschodzący rynek energii elektrycznej (2)	Rynek polski o „zerowym" stanie A, który będzie się rozwijał w kolejnych dekadach w korytarzu infrastrukturalno-urbanistycznym „odwrócone T" na hybrydowej infrastrukturze sieciowej AC-DC o napięciu 110 kV i powyżej.

Tytułowa transformacja energetyki będzie – z uwagi na jej przełomowy charakter – w sposób naturalny konsolidować metodę nowej energetyki. Z punktu widzenia znaczenia praktycznego będzie to metoda energii użytecznej („energetyki" stanu B). W kontekście teoretycznym będzie to metoda monizmu elektrycznego (transformującego energetykę paliw kopalnych stanu A w zaspakajanie powszechnych prosumenckich potrzeb energetycznych w stanie B za pomocą energii użytecznej). Oczywiście, konsolidacja metody będzie obfitować w wiele zwrotów (prób i porażek).

W artykule wyjściowo stawia się hipotezę, że w konsolidacji metody (zwłaszcza w jej początkowej fazie) użyteczne będzie hybrydowe podejście realizowane w zamkniętej pętli indukcyjno-dedukcyjno-indukcyjnej. Indukcyjny początek pętli metodycznej wynika z daleko już zaawansowanego rozwoju technologicznego (obejmującego trzy wielkie segmenty technologiczne, którymi są: efektywne energetycznie odbiorniki-odbiory, źródła OZE, inteligentna infrastruktura). Taki początek ma także uzasadnienie w formułowanych coraz częściej przełomowych koncepcjach tworzonych dla potrzeb rynków energii elektrycznej.

Komercjalizacja nowych technologii energetycznych zapewnia już masową dostępność empirycznych obserwacji (wyników zastosowań tych technologii). Z kolei przełomowe koncepcje wirtualizacji systemu elektroenergetycznego za pomocą osłon kontrolnych (dedykowanych potrzebom rynku energii elektrycznej czasu rzeczywistego) – wykorzystujące

zgodnie z zasadą TPA+ inteligentne terminale dostępowe rynku wschodzącego energii elektrycznej (1) do rynku schodzącego WEK – umożliwiają ich (koncepcji) symulacyjne testowanie. To znowu oznacza masową dostępność empirycznych obserwacji, w tym wypadku w postaci wyników symulacji. Dostępność empirycznych obserwacji jest z kolei fundamentem indukcyjnego poznania.

Dlatego pierwszą część artykułu stanowi krótki szkic poświęcony charakterystycznym oszacowaniom praktycznym rynków/bilansów energii w stanach A i B procesu transformacyjnego. Oszacowaniom w różnych wymiarach: w najmniejszym wymiarze gospodarstwa domowego (charakterystycznego dla Polski), w wymiarze krajowym/polskim, a także w wymiarze globalnym.

Wyniki oszacowań, bardzo zaskakujące, zmuszają do „odnalezienia" ich podstaw teoretycznych. Dlatego drugą część artykułu stanowi szkic poświęcony teoretycznym przesłankom tripletu paradygmatycznego. Także wstępnemu sformułowaniu (hasłowemu opisowi) każdego z tych paradygmatów. Podstawy matematyczne (termodynamiczne, elektrotechniczne, informatyczne), a także wyniki teoretyczne nauk przyrodniczych, społecznych i ekonomicznych są fundamentem dedukcyjnego rozpoznania transformacji energetycznej.

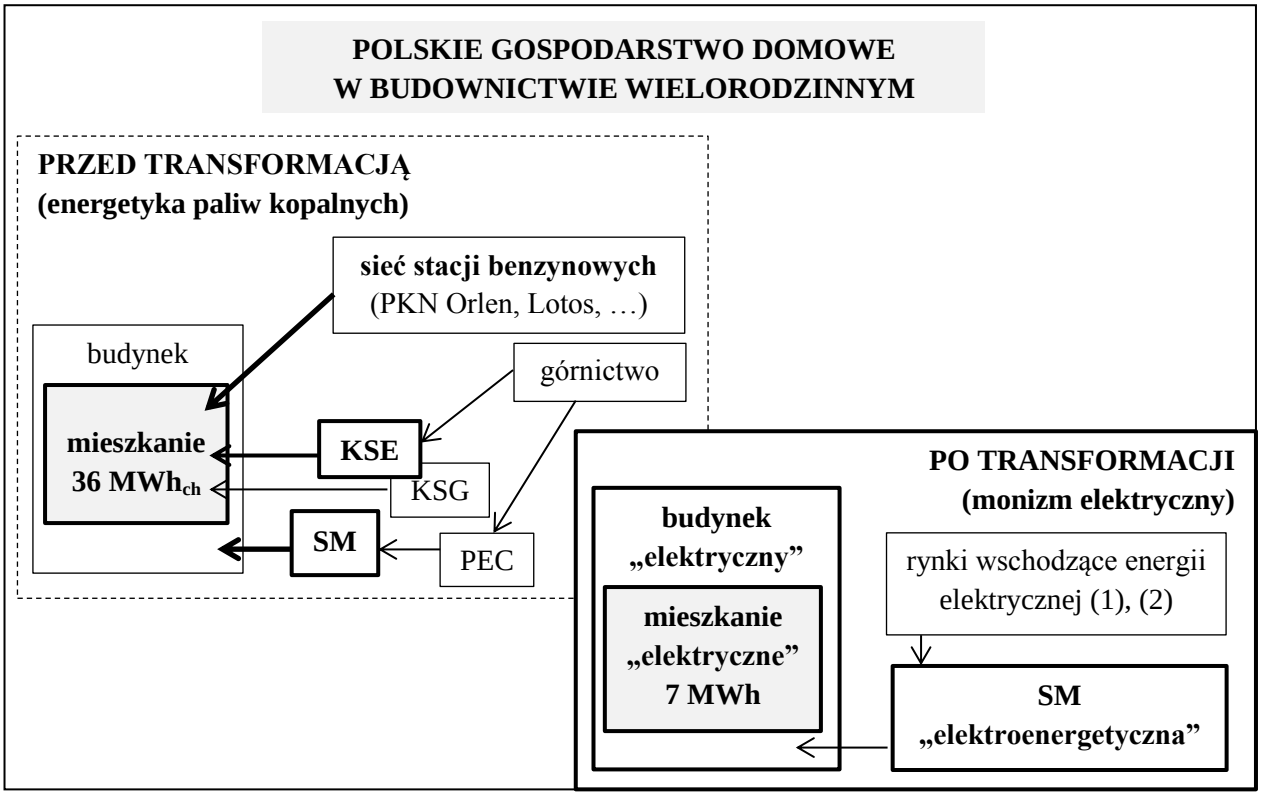
Mimo, że do ugruntowania się tripletu droga jest jeszcze daleka (o ugruntowaniu będzie można mówić kiedy pojawią się podręczniki), to bezsporne już odwrócenie kierunku fundamentalnych oddziaływań w obszarze energetyki na kierunek od mikroekonomii do makroekonomii (tym samym od korporacyjnej polityki energetycznej do prosumenckiego zaspakajania potrzeb energetycznych w formule monizmu elektrycznego) przesądza o potrzebie powrotu w pętli metodycznej do podejścia indukcyjnego (budowania rzeczywistości makroekonomicznej poprzez decyzje mikroekonomiczne). Dlatego trzecią część artykułu stanowi szkic poświęcony architekturze nowego rynku energii elektrycznej i ekwiwalentowaniu osłon kontrolnych na tym rynku do potrzeb projektowania mechanizmów rynkowych, zdolnych nadawać racjonalną dynamikę trajektorii transformacyjnej energetyki.

Część I
RYNKI ENERGII PIERWOTNEJ, KOŃCOWEJ I UŻYTECZNEJ

Skutki popytowego monizmu elektrycznego, i transformacji energetycznej, najdobitniej pokazują bilanse energii elektrycznej: pierwotnej, końcowej i użytecznej. Bilanse pokazane na rys.1 (polskie gospodarstwo domowe), na rys. 2 (Polska) i na rys. 3 (świat) są niezwykle pouczające w kontekście metodycznym (skalowalność metody nowej energetyki), ale także praktycznym (oszacowania pokazujące ogromny potencjał redukcyjny w energetyce, wynikający z „rozwarcia" bilansów energii pierwotnej i użytecznej). W szczególności dostrzeżenie w transformacji energetycznej sposobu na zwalczanie strat egzergii chemicznej i jądrowej za pomocą wysokoegzergetycznej energii elektrycznej ze źródeł OZE pozwala przyspieszyć pokonanie powszechnego syndromu „więźnia własnej wyobraźni" (braku wyobraźni dotyczącego skutków transformacji energetycznej, dotykającego rządzących, społeczeństw, ale także nauki). Pozwala ponadto uczynić efektywniejszymi wysiłki na rzecz racjonalizacji wykorzystania istniejących (ciągle ogromnych) zasobów energetyki WEK.

Wymiar polskiego gospodarstwa domowego

Rysunek 1 przedstawia sytuację najmniejszej „jednostki” energetycznej w procesie transformacji energetycznej, którą jest gospodarstwo domowe (mieszkanie); na rysunku – reprezentatywne polskie mieszkanie w budownictwie wielorodzinnym (blok mieszkalny). Istoty transformacji energetycznej gospodarstwa trzeba poszukiwać w rozległym środowisku.



Rys. 1. Rozległe środowisko spółdzielni energetycznej dopełniającej spółdzielnię mieszkaniową
SM – spółdzielnia mieszkaniowa; KSE, KSG – krajowy system elektroenergetyczny, gazowniczy, PEC – przedsiębiorstwo energetyki cieplnej

Mianowicie, z jednej strony powinno to być poszukiwanie w ramach elektrycznie zorientowanej integracji sposobu zaspakajania potrzeb energetycznych „budynku” (jego mieszkańców, gospodarstw domowych), aż do wyniku (w stanie B) w postaci mieszkania „elektrycznego” (gospodarstwa domowego „elektrycznego”), z zapotrzebowaniem na energię użyteczną (elektryczną energię „napędową”, jedyną) równą 7 MWh.

Istoty tej trzeba szukać także w interakcjach na stykach trzech infrastruktur. Po pierwsze, na styku infrastruktury budynkowej, na którą składają się w dominującej części odbiorniki/odbiory i instalacje (stopniowo będę to: źródła wytwórcze PV oraz – w procesie transformacyjnym, między stanami A i B – gazowe trójgeneracyjne i dieslowskie agregaty prądotwórcze; akumulatory elektryczne odbiornikowe, instalacyjne, samochodowe; zasobniki CWU, ale ma także znaczenie cała budynkowa bezwładność cieplna; inteligentna infrastruktura). Po drugie, na styku infrastruktury spółdzielczej (także wspólnotowej i deweloperskiej), na którą obecnie składa się sieciowa infrastruktura przyłączeniowa do sieci (elektroenergetycznej, ciepłowniczej, gazowej) dostawców WEK i odbiory „wspólne”

(a stopniowo będę to: źródła PV oraz gazowe trójgeneracyjne i dieslowskie agregaty prądotwórcze, sieć elektroenergetyczna, inteligentna infrastruktura, infrastruktura transportu elektrycznego). Po trzecie, na styku infrastruktury energetyki WEK, na którą obecnie składają się infrastruktura elektroenergetyczna KSE, gazowa KSG oraz ciepłownicza PEC, a stopniowo będzie to głównie infrastruktura rynków wschodzących energii elektrycznej (1), (2), piąty Raport BŻEP [1].

Przedstawiona na rys. 1 wartość zapotrzebowania na energię chemiczną paliw kopalnych przypadającego na gospodarstwo w stanie A (przed transformacją) w postaci węgla do produkcji energii elektrycznej i ciepła, gazu do produkcji ciepła i paliw transportowych, wynosząca 36 MWh_{ch}, została oszacowana w następujący sposób. Roczne zużycie energii elektrycznej na gospodarstwo zostało przyjęte na poziomie 2 MWh (pokrycie zapotrzebowania za pomocą produkcji w elektrowniach węglowych). Roczne zużycie ciepła grzewczego na gospodarstwo przyjęto na poziomie 18 MWh (mieszkanie o powierzchni 60 m^2, roczne jednostkowe zapotrzebowanie ciepła grzewczego przed termomodernizacją 300 kWh/m^2, budynek wybudowany w latach 1970.). Roczne zużycie ciepła CWU na gospodarstwo przyjęto na poziomie 3 MWh (gospodarstwo 3-osobowe). Wreszcie, roczne zużycie paliw transportowych na gospodarstwo przyjęto na poziomie 10 MWh (roczny przebieg samochodu około 15 tys. km).

Zapotrzebowanie charakterystyczne dla stanu B (po transformacji) w postaci elektrycznej energii napędowej potrzebnej do zaspokojenia wszystkich potrzeb energetycznych gospodarstwa, wynoszące 7 MWh (energia użyteczna), zostało oszacowane przy założeniu niezmiennej liczby osób tworzących gospodarstwo i niezmiennym rocznym przebiegu samochodu (samochodów). Dalej, przy założeniu niezmiennego rocznego zapotrzebowania gospodarstwa na energię elektryczną (w tym założeniu kryje się pierwotne założenie, że poszerzanie wolumenu usług, dla których energią napędową jest energia elektryczna (z wyłączeniem pomp ciepła i samochodów elektrycznych) jest w trwałej równowadze z poprawą efektywności elektrycznej odbiorników/odbiorów elektrycznych). Ponadto, przy założeniu rocznego jednostkowego zapotrzebowania ciepła grzewczego po termomodernizacji 100 kWh/m^2 oraz niezmiennego jednostkowego (na osobę) zużycia ciepła CWU (w tym założeniu kryje się pierwotne założenie, że ewentualny wzrost jednostkowego zużycia ciepła CWU warunkowany względami komfortu jest w równowadze z poprawą efektywności termodynamicznej urządzeń służących do produkcji i użytkowania ciepła CWU).

W odniesieniu do potrzeb ciepłowniczych budynku, a wynikowo w odniesieniu do mieszkania w budynku, przyjęto elektryfikację za pomocą monowalentnej pompy ciepła o współczynniku COP równym 3,2 (lub ekwiwalentnego systemu mono-energetycznego). W odniesieniu do potrzeb transportowych przyjęto zmianę sprawności eksploatacyjnej samochodu w ruchu mieszanym (miejskim i pozamiejskim) ze sprawności 17% w wypadku samochodu tradycyjnego na sprawność 50% w wypadku samochodu elektrycznego.

Wymiar polski (krajowy)

Jest niezwykle trudne zmierzenie się Polski z wyzwaniem, którego istota została zobrazowana na rys. 2. W pierwszym przybliżeniu wyzwanie to polega na zastąpieniu w 2050 r. (w wyniku przeprowadzenia do tego czasu głębokiej transformacji całej energetyki) energii chemicznej (łącznie z jądrową) w paliwach kopalnych równej 3000 TWh (w modelu

business as usual) w energią elektryczną ze źródeł OZE (użyteczną) równą 200 TWh, czyli 15-krotnie mniejszą (nie ma tu istotnego znaczenia, że ta krotność może być mniejsza; ma natomiast znaczenie, że jest to głęboka zmiana jakościowa energetyki, największa w historii).

RYNKI POLSKIE, TWh

ENERGIA PIERWOTNA
energia chemiczna w węglu kamiennym i brunatnym, ropie naftowej i gazie ziemnym powiększona o energię jądrową w paliwach jądrowych załadowanych do reaktorów w elektrowniach jądrowych (dwie elektrownie jądrowe, 2x1600 MW każda)

2020	2050
1000	1500/3000 (P)

ENERGIA KOŃCOWA
energia elektryczna, ciepło, paliwa transportowe, pozyskiwane z paliw kopalnych

2020	2050
600	1100 (H)

ENERGIA UŻYTECZNA
na mono rynku energii elektrycznej OZE

2020	2050
200 (H)	200 (A)

Rys. 2. Rynki energii pierwotnej, końcowej i użytecznej, w TWh/rok, w polskiej perspektywie i w horyzoncie 2050; (P) – prognoza, (H) – rynek hipotetyczny, albo ekwiwalentny, (A) – antycypacja

Krótki komentarz do oszacowań przedstawionych na rys. 2, nawiązujących do oszacowań dla gospodarstwa domowego (rys. 1) i dla świata (rys. 3) jest następujący. Oszacowanie (prognostyczne) energii pierwotnej dla 2050 r. jest charakterystyczną, dla środowiska technologicznego całej energetyki WEK, sumą zużycia energii chemicznej w węglu kamiennym i brunatnym, ropie naftowej i gazie ziemnym oraz energii jądrowej (w paliwie jądrowym zużywanym rocznie przez dwie elektrownie jądrowe, 2x1600 MW każda, ciągle występujące w polityce rządowej, chociaż prezentowanej w bardzo „niestabilny”sposób). W oszacowaniu przyjęto, że zużycie węgla, ropy i gazu rośnie rocznie o 1,3% (zatem we współczesnej perspektywie niewiele); przy takim wzroście zużycia tych paliw roczna energia pierwotna (chemiczna) rośnie w 2050 r. do około 1500 TWh. Dwukrotny wzrost energii pierwotnej w stosunku do tej wartości podany na rys. 1 dla 2050 r., aż do wartości 3000 TWh, wynika natomiast z wprowadzenia do bilansu energii pierwotnej energii paliw jądrowych. Przy rocznej produkcji energii elektrycznej w blokach jądrowych wynoszącej około 50 TWh, energia jądrowa paliwa załadowanego do reaktorów bloków wynosi nie mniej niż 1500 TWh. Wynika to ze sprawności wykorzystania paliwa jądrowego w produkcji energii elektrycznej, będącej iloczynem bardzo niskiej sprawności układu obejmującego reaktor wraz

z wytwornicą pary oraz niskiej sprawności turbiny parowej. Mianowicie, pierwsza kształtuje się na poziomie poniżej 10%, a druga poniżej 45%; łączna sprawność kształtuje się poniżej 3%.

Oszacowanie energii końcowej przedstawione na rys. 2 dla 2050 r. jest charakterystyczne dla modelu kontynuacji (dla środowiska technologicznego całej energetyki WEK i „biernych" odbiorców), uwzględnia przy tym wykorzystanie innowacji przyrostowych. Uzyskana (hipotetyczna) wielkość rynku energii końcowej w 2050 r. wynosząca 1100 TWh odpowiada rocznemu wzrostowi rynku końcowego równemu 1,9% (znowu, we współczesnej perspektywie jest to wzrost bardzo niewielki).

Oszacowanie rocznej energii użytecznej przedstawione na rys. 2, wynoszące 200 TWh (wartość hipotetyczna albo inaczej ekwiwalentna w stanie A oraz antycypowana w stanie B), wiąże się z przebudową energetyki (w całości) w trybie innowacji przełomowej. Inaczej, jest to przebudowa do nowego modelu, mianowicie monizmu elektrycznego, stanowiącego rezultat transformacji współczesnych rynków energetycznych WEK w nową rzeczywistość energetyczną realizowaną przez pretendentów. Pretendentami, odwracającymi bieg spraw na dotychczasowych rynkach za pomocą innowacji przełomowych (osadzonych we wszystkich czterech środowiskach: technologicznym, ekonomicznym, organizacyjnym i społecznym), są prosumenci (energetyka EP) i niezależni inwestorzy (energetyka NI).

Przedstawione oszacowanie rynku energii użytecznej uwzględnia całkowitą przebudowę sposobu zaspokajania potrzeb energetycznych na rzecz ludności (jest to w szczególności pasywizacja budownictwa, elektryfikacja ciepłownictwa i elektryfikacja transportu), ale także na rzecz całej gospodarki, łącznie z przemysłem (w tym wypadku zasadnicze znaczenie ma restrukturyzacja przemysłu w kierunku przemysłu 4.0). Jakościowa przebudowa rynku usług energetycznych powoduje stabilizację wolumenu energii użytecznej. Mianowicie, hipotetyczna wielkość wolumenu w stanie A jest równa antycypowanej wielkości wolumenu w stanie B. Przy tym wolumen na mieszkańca nieznacznie rośnie (o około 0,3%), co wynika ze spadku liczby ludności (z około 38 mln w stanie A do około 35 mln w stanie B).

Wymiar globalny

Rysunek 3 przedstawiający w wymiarze globalnym ogólną strukturę rynków energii – pierwotnej, końcowej i użytecznej – odzwierciedla trzy aspekty: podmiotowy (ludnościowy), czasowy (okres transformacji) oraz przedmiotowy (energetyczny). Aspekt ludnościowy uznaje się tu za nadrzędny. Wynika to stąd, że nie rozwiąże się na świecie żadnego z nabrzmiewających niezwykle dynamicznie problemów, jeśli cała populacja światowa będzie miała dostęp do telefonów i Internetu, ale nie będzie miała dostępu, na racjonalnym poziomie, do energii elektrycznej.

Aspekt czasowy jest ważny z punktu widzenia granicznych dat okresu transformacyjnego. Chodzi w szczególności o uznanie, że przełom bieżącej dekady jest w globalnej perspektywie przełomem w całej energetyce, nie tylko w górnictwie (węgla kamiennego i brunatnego) oraz w elektroenergetyce (w tym jądrowej), ale także w sektorze paliw transportowych i gazu ziemnego (również łupkowego), i przede wszystkim w sferze wykorzystania „surowych" paliw kopalnych oraz użytkowania energii elektrycznej, ciepła i paliw transportowych. Z kolei horyzont 2050, powszechnie łączony z celami globalnej

polityki klimatyczno-energetycznej musi być rozpatrywany coraz bardziej w perspektywie globalnych celów cywilizacyjno-społecznych.

RYNKI GLOBALNE, tys. TWh

ENERGIA PIERWOTNA
(energia chemiczna w węglu kamiennym i brunatnym, ropie naftowej i gazie ziemnym powiększona o energię jądrową w paliwach jądrowych załadowanych do reaktorów w elektrowniach jądrowych)

2020	2050
190	**380 (P)**

ENERGIA KOŃCOWA
(energia elektryczna, ciepło, paliwa transportowe)
w środowisku technologicznym energetyki WEK
i „biernych" odbiorców

2020	2050
85	**170 (H)**

ENERGIA UŻYTECZNA
(elektryczna OZE)
w środowisku technologicznym energetyki EP-NI-WEK
(technologie: ICT, OZE, LED, PH, HP, EV, UPS)

2020	2050
38 (H)	**75 (A)**

Rys. 3. Rynki energii pierwotnej, końcowej i użytecznej w globalnej perspektywie i w horyzoncie 2050; (P) – prognoza, (H) – rynek hipotetyczny, albo ekwiwalentny, (A) – antycypacja

Wreszcie aspekt energetyczny jest krytyczny z punktu widzenia potrzeby powszechnej implementacji osiągniętego już rozwoju środowiska technologicznego (ICT, OZE, LED, PH, HP, EV, UPS). Ponadto, jest to bardzo ważne, z punktu widzenia potrzeby rekonstrukcji grup interesów; interesów nieadekwatnych już do potrzeb współczesnego społeczeństwa. Musi to być rekonstrukcja zapewniająca wytworzenie grup interesów bardziej nowoczesnych, prospołecznych. W szczególności grup interesów uznających z jednej strony mechanizmy konkurencji adekwatne do osiągniętego już poziomu społecznej wydajności pracy, a z drugiej rozszerzające zakres wolności gospodarczej i osobistej ludzi (jednostek).

Część II
TRIPLET PARADYGMATYCZNY

W sensie metody naukowej, czyli organizacji poznania (i kształcenia), prezentuje się tu hipotezę roboczą, że użyteczne jest odnalezienie „kodu genetycznego" dokonującej się globalnej transformacji energetyki. Punktem wyjścia do tej hipotezy (nadrzędnej) jest

hipoteza niższego poziomu. Mówi ona o tym, że dokonująca się transformacja energetyki ma z punktu widzenia badawczego charakter wieloparadygmatowy, czyli jest procesem kształtowanym, potencjalnie, przez wiele paradygmatów.

Na tym (niższym) poziomie paradygmaty określają środowisko poznawcze, w którym warto poszukiwać istoty transformacji. Czyli poszukiwać praw – w środowisku rozumowania zarówno indukcyjnego jak i dedukcyjnego – wiążących ze sobą praktyczne koncepcje transformacyjne energetyki. Ale także, umożliwiających tworzenie narzędzi pozwalających na rozumową, *a priori*, weryfikację koncepcji (tych może być z natury rzeczy wiele). Podkreśla się tu, że weryfikacja koncepcji fałszywych, dokonywana w trybie biernym, czyli *a posteriori*, jest w wypadku energetyki zawsze niezwykle kosztowna.

W przedstawionym kontekście triplet paradygmatyczny ukierunkowuje dociekania i tworzy podstawę rozumienia transformacji energetycznej, jako samoistnego procesu zachodzącego w przestrzeni społecznej i przyrodniczej. Przede wszystkim zaś triplet tworzy ramy ustalania praktycznych rozwiązań kształtujących trajektorię transformacyjną, na które składają się: decyzje polityczne, regulacje prawne i mechanizmy rynkowe.

W celach porządkowych (uzyskania większej przejrzystości dalszych rozważań) wprowadza się określenia: stan A (obecny) i B (stan związany z horyzontem czasowym 2050, w którym proces transformacji energetycznej osiąga dojrzałość rynkową w stopniu zgodnym z jego kodem genetycznym); dla stanu B stosuje się też zapis (A + 30), co praktycznie oznacza, że stan A identyfikuje się w sensie formalnym ze stanem 2020.

Stan A, to energetyka paliw kopalnych. W najogólniejszym sensie są one bogactwami naturalnymi nie będącymi w równowadze termodynamicznej z otaczającą przyrodą. Jest to definicja, która łączy nierozerwalnie (wyraziście) energetykę z rozwojem zrównoważonym (i z polityką klimatyczną). Z tej definicji wynika centralna rola termodynamiki w metodzie naukowej charakterystycznej dla energetyki w stanie A. Zatem na pewno jeden (przynajmniej jeden) z paradygmatów nowej energetyki musi nawiązywać do metody termodynamiki.

Po drugie, stan A to energetyka końca epoki przemysłowej, która ukształtowała, z dwoma nowożytnymi – w perspektywie cywilizacyjnej – charakterystycznymi ustrojami społeczno-politycznymi: interwencjonizmem państwowym i korporacjonizmem. Zatem znowu, jeden (przynajmniej jeden) z paradygmatów musi nawiązywać do napięć w sferze społecznej, które z niezwykłą siłą ujawniły się wraz z globalizacją. W szczególności musi nawiązywać do metod: socjologii, ekonomii, nauk prawnych, a także do innych nauk społecznych.

Po trzecie, stan A to energetyka, której metoda badawcza i praktyka zostały ukształtowane przed rewolucją cyfrową. W tym stwierdzeniu zawiera się fundamentalny przekaz o nieadekwatności metody energetyki stanu A względem środowiska technologicznego (inteligentne materiały, szeroko rozumiany przemysł ICT, cyfryzacja), które wytworzyła globalizacja spowodowana rewolucją cyfrową. Konsekwentnie, jest to przekaz o nieadekwatności względem społeczeństwa rewolucji cyfrowej, czyli społeczeństwa sieci (chmury). W tym obszarze jeden (przynajmniej jeden) z paradygmatów musi nawiązywać do elektryki (elektrotechniki bardzo szeroko rozumianej) i informatyki. W tym do systemu elektroenergetycznego i teleinformatyki, zwłaszcza w kontekście współdzielenia sieci: komputerowych, teleinformatycznych, elektroenergetycznych.

Przestrzeń pojęciowa tripletu paradygmatycznego

Przestrzeń pojęciową tripletu paradygmatycznego tworzy pięcioelementowy zbiór pojęć. Po pierwsze, są to zasoby w szerokim rozumieniu (materialne, w tym przyrodnicze, ale także społeczne). Po drugie, jest to entropia (również w szerokim rozumieniu, w szczególności: termodynamicznym i informatycznym).

Trzecim pojęciem, także o kluczowym znaczeniu jest egzergia. Bilans egzergetyczny stanowi w Raporcie główną przesłankę do zdefiniowania energii użytecznej jako potrzebnej pracy (w kategoriach termodynamicznych) na rzecz realizacji prosumenckich, holistycznych usług energetycznych (w środowisku monizmu elektrycznego). Inaczej, jest to maksymalna praca możliwa do uzyskania z różnych rodzajów energii (wyznaczona w stosunku do otaczającej przyrody): obecnie z energii chemicznej paliw kopalnych i energii jądrowej, a na drugim biegunie (w horyzoncie 2050) z energii elektrycznej ze źródeł OZE (z uwzględnieniem spadku egzergii zewnętrznych źródeł ciepła, realizowanego za pomocą pompy ciepła napędzanej energią elektryczną, oraz egzergii surowców nieenergetycznych, zwłaszcza wykorzystywanych w procesie pasywizacji budownictwa).

Czwartym wyróżnionym środowiskiem pojęciowym, o kluczowym znaczeniu, są prawa elektrotechniki. Rozumiane ogólnie jako prawa elektryczne w sieciowych systemach elektroenergetycznych prądu przemiennego, czyli prawa fizyczne rządzące najbardziej złożoną i rozległą, a przy tym najbardziej wrażliwą politycznie, infrastrukturą techniczną. Ale także prawa obowiązujące w zelektronizowanych oraz zinformatyzowanych odbiornikach i odbiorach elektrycznych, a także w prosumenckich instalacjach energetycznych; czyli prawa w elektrotechnice prądu przemiennego, prądu stałego i przebiegów bardzo silnie odkształconych.

Piąte środowisko pojęciowe, kluczowe w kontekście kształtowania nowej energetyki, dotyczy odwrócenia kierunku wymuszeń społeczno-ekonomicznych działających na energetykę. Chodzi o zmianę dotychczasowych wymuszeń, od makroekonomii do mikroekonomii, na wymuszenia przeciwne: od mikroekonomii do makroekonomii. Jest to na pewno fundamentalna zmiana z punktu widzenia społeczno-ekonomicznego. Z tym łączy się w pewnym stopniu zmiana metody energetyki, mianowicie w części związanej z przeniesieniem akcentu z metod dedukcyjnych na metody indukcyjne. Pierwsze są warunkowane faktem, że energetyka WEK, operująca agregatami, jest rządzona polityką energetyczną; energetyka ta wytworzyła w procesie historycznym własne cele (jest to ochrona bezpieczeństwa grup interesów) i działała na rzecz ich realizacji. Drugie są charakterystyczne dla energetyki EP-NI kształtującej makroekonomię oddolnie, wynikowo; przedmiotem tej energetyki jest zaspakajanie potrzeb energetycznych indywidualnych podmiotów (w środowisku monizmu elektrycznego).

Zasoby. Termin „zasób" jest na poziomie paradygmatów transformacji energetycznej terminem abstrakcyjnym. Jego użyteczność praktyczna nie może być jednak kwestionowana, jeśli uwzględni się, że charakteryzuje on najlepiej bardzo zróżnicowane dobra – materialne, ekonomiczne, społeczne (kapitał społeczny) – uczestniczące w transformacji energetycznej (podlegające przekształceniom, ale będące również siłami napędowymi transformacji).

W sferze materialnej transformacja obejmuje bezpośrednio zasoby w postaci paliw kopalnych, zasoby energii odnawialnej, infrastrukturę techniczną (podstawową i wspomagającą) oraz wiele innych zasobów. Pośrednio w sferze materialnej transformacja obejmuje także środowisko przyrodnicze, w którym energetyka funkcjonuje. Oczywiście, w zakresie w którym to funkcjonowanie naraża środowisko przyrodnicze na ryzyko nieodwracalnej degradacji (sprawa kosztów zewnętrznych funkcjonowania energetyki). W wypadku sfery materialnej można generalnie mówić o zasobach „twardych". Przy tym obszar występowania kosztów zewnętrznych tworzy płynną strefę zmian prawno-regulacyjnych. Potencjalnie zmiany te przekształcą w procesie transformacji energetycznej ryzyko degradacji środowiska naturalnego w rozwiązania w obszarze infrastruktury (technologie wytwórcze i sieciowe na rynku energii elektrycznej, instalacje ochrony środowiska, technologie gospodarki w obiegu zamkniętym, technologie cyfrowe zarządzania prosumencką gospodarką energetyczną), czyli w zasoby twarde.

Odrębną sprawą na poziomie paradygmatów transformacji energetycznej jest zapewnienie odpowiedniej reprezentatywności zagadnień związanych z kapitałem finansowym. „Odpowiednia" reprezentatywność to taka, która rozstrzyga w jakim stopniu kapitał finansowy stanowi z punktu widzenia transformacji energetycznej zasoby „twarde", a w jakim „miękkie". Współcześnie to zagadnienie trzeba już rozważać w perspektywie przekształcania się rynków finansowych w rynki hazardowe. Zatem zasoby finansowe w transformacji energetycznej transformują się w kierunku od zasobów twardych do zasobów miękkich.

Inny charakter mają determinanty transformacji energetycznej lokujące się w obszarze kapitału ludzkiego, z takimi składowymi jak: *know how*, kapitał intelektualny i zarządzanie tym kapitałem (kompetencje ludzi w organizacjach), ale również kapitał społeczny (potencjał jego wykorzystania w transformacji energetycznej). Kapitał ludzki tworzy zasoby, których znaczenie gwałtownie rośnie w związku z faktem, że transformacja energetyczna staje się największym i najbardziej zdemokratyzowanym globalnym poligonem innowacyjności (twardej i miękkiej). Niezależnie od tego kapitał ludzki w triplecie paradygmatycznym zalicza się do zasobów miękkich.

Entropia. W kontekście transformacji energetycznej duże znaczenie ma entropia, i to zarówno termodynamiczna jak i informacyjna. Mianowicie, jest to pojęcie o dużym potencjale objaśniającym transformację w trzech wymiarach: intelektualnym, etycznym, ale także bezpośrednio praktycznym (inżynierskim i ekonomicznym).

***

Entropia termodynamiczna. Jest to termodynamiczna funkcja stanu; zmiana wartości tej funkcji przy przejściu z jednego stanu (makrostanu) do drugiego zależy tylko od tych stanów, nie zależy natomiast od sposobu/drogi przejścia między tymi stanami. W kontekście przemian termodynamicznych jest to uogólnione przemieszczenie. Zmienną sprzężoną (napędową entropii) jest temperatura. Przykładem innej pary zmiennych sprzężonych w procesach termodynamicznych jest para: ciśnienie-objętość. (Dla wszystkich układów mechanicznych zmiennymi sprzężonymi są: siła-droga; iloczyn tych zmiennych jest pracą).

Termodynamiczna "siła" jest zawsze zmienną intensywną, natomiast "przesunięcie" jest zawsze zmienną ekstensywną. Wynikiem jest ekstensywna zmiana energii (praca lub ciepło). Zmienna intensywna jest pochodną energii wewnętrznej po zmiennej ekstensywnej przy stałych pozostałych zmiennych intensywnych.

W ramach drugiej zasady termodynamiki zmiana entropii zdefiniowana jest (w procesach kwazistatycznych) przez swoją różniczkę zupełną:

$$dS = \frac{1}{T}\delta Q, \tag{1}$$

gdzie: S – entropia, T – temperatura, δQ – ciepło elementarne.

Entropię (pewnego) stanu termodynamicznego P można wyznaczyć ze wzoru:

$$S(P) = \int_0^{T_P} \frac{C(T)dT}{T}, \tag{2}$$

gdzie: C – pojemność cieplna, T_P – temperatura w stanie P.

W terminach termodynamiki statystycznej entropię opisuje następujący wzór:

$$S = k\ln(W) \quad \text{lub} \quad S = -k\sum_i p_i \ln(p_{i)}, \tag{3}$$

gdzie: k – stała Boltzmanna, W – liczba sposobów, na jakie makrostan (makroskopowy stan termodynamiczny układu) może być zrealizowany poprzez mikrostany (stany mikroskopowe), p_i – prawdopodobieństwo stanu i.

Druga zasada termodynamiki (jak i pozostałe) ma sformułowanie wynikające z doświadczeń i obserwacji. W takim sensie entropia w termodynamice klasycznej jest przyjętą wielkością. Równanie (3) pozwala natomiast wyjaśnić istotę entropii: każdy układ zamknięty pozostawiony sam sobie albo się nie zmienia, albo zwiększa swoje nieuporządkowanie. Stąd prosta droga prowadzi do termodynamicznej (entropowej) strzałki czasu: każdy makroskopowy układ zamknięty, który miał mniejszą entropię musiał się znajdować na osi czasu wcześniej niż układ o większej entropii.

Termodynamiczna strzałka czasu (wzrost entropii w czasie) powiązana z drugą zasadą termodynamiki w sformułowaniu R. Clausiusa (ciepło nie może samorzutnie przepłynąć ze źródła o niższej temperaturze do źródła o wyższej temperaturze) prowadzi do stwierdzenia, że Wszechświat dąży do śmierci cieplnej (do stanu termicznej równowagi), która oznacza zanik przemian termodynamicznych, $S = max$.

***

Entropia informacyjna. Do (statystycznej) interpretacji termodynamiki nawiązuje ściśle entropia informacyjna będąca miarą średniej ilości informacji, wielkości matematycznej definiowalnej i mierzalnej w przestrzeni probabilistycznej. Zgodnie z fundamentalną koncepcją teorii informacji ilość informacji (zmagazynowanej, wysłanej, przesłanej,

odebranej) nie odnosi się do znaczenia przekazywanej wiadomości, jest natomiast związana z prawdopodobieństwem, że wiadomość zostanie odebrana (odczytana). Wzór na entropię informacyjną ma postać:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_m = -c \sum_{i=1}^{m} p_i \log_2 p_i, \tag{4}$$

gdzie: p_i – prawdopodobieństwo przypisane komunikatowi (nośnikowi wiadomości); podstawa funkcji logarytmicznej równa 2, wpisana do wzoru, jest przypadkiem szczegółowym, związanym z system dwójkowym powszechnie obowiązującym w teorii informacji; tej podstawie odpowiada najmniejsza jednostka entropii informacyjnej – jest nią bit (8 bitów, to 1 bajt).

W kontekście paradygmatów transformacji energetycznej podkreśla się ogólnie, że entropia termodynamiczna jest miarą nieuporządkowania układu termodynamicznego i rozproszenia energii. W szczególności zaś podkreśla się powiązanie tej entropii z drugą i trzecią zasadą termodynamiki oraz z hipotezą śmierci cieplnej Wszechświata. Mianowicie, entropia termodynamiczna jest treścią drugiej zasady termodynamiki, mówiącej że w przyrodzie entropia (termodynamiczna) może jedynie wzrastać (odwołanie się w drugiej zasadzie termodynamiki do entropii jest tylko jedną z możliwości, wśród wielu innych definicji słownych). Przy tym w przemianach termodynamicznych interesujące są na ogół zmiany entropii, a nie entropia jako taka. Poziom odniesienia określa się dla entropii termodynamicznej, zgodnie z postulatem Plancka, w temperaturze 0 °K, czyli dla substancji będącej w stanie doskonałego kryształu. W tej temperaturze wartość entropii $S = 0$ (ta wartość nie obowiązuje dla reakcji jądrowych, w których zachodzi przebudowa jądra atomu). Związek entropii termodynamicznej z trzecią zasadą termodynamiki wynika z teorematu Nernsta. Zgodnie z tym teorematem w temperaturze 0 °K suma entropii substratów wchodzących w reakcję chemiczną jest równa sumie entropii produktów.

Gdy w układzie nie ma niepewności (prawdopodobieństwo jednego ze stanów jest równe 1, to entropia informacyjna $S = 0$. Gdy wszystkie stany są jednakowo prawdopodobne, to entropia $S = max$. Oczywiście, w takim ujęciu entropia informacyjna jest domeną informatyki, i poprzez informatykę ma wpływ na transformację energetyki. Jeśli jednak korzysta się z uogólnionego pojęcia entropii – do zbioru funkcji za pomocą których można opisać ilościowo różnorodność, niepewność czy losowość systemu – to jest zrozumiałe, że entropia informacyjna tworzy silne narzędzie do opisu rynku, szczególnie rynku energii elektrycznej.

Dwa obszary potencjalnych zastosowań entropii informacyjnej dla potrzeb rynku energii elektrycznej są szczególnie ważne. Pierwszym jest współużytkowanie infrastruktury sieciowej (tworzenie nowych zasad tego współużytkowania: odejście od monopolu sieciowego, jego zastąpienie zasadą TPA+). Drugim jest kształtowanie końcowych cen energii elektrycznej (tworzenie nowych zasad cenotwórstwa końcowego: odejście od taryf będących emanacją przeciętnych cen rocznych, zastąpienie ich krańcowym cenotwórstwem czasu rzeczywistego). To, że entropia informacyjna osiąga wartość maksymalną dla równomiernego rozkładu prawdopodobieństwa stanów zmiennej (statystycznej, probabilistycznej) prowadzi w odniesieniu do obydwu zagadnień do bardzo daleko idącego wniosku: zarówno monopol

sieciowy jak i ceny przeciętne (taryfy dla odbiorców końcowych) oznaczają śmierć entropijną rynku energii elektrycznej.

Egzergia. Jest to wielkość charakteryzująca energię pod względem jej przydatności praktycznej. Mianowicie, oznacza maksymalną (po przyjęciu odniesienia w postaci otaczającej przyrody) zdolność przetworzenia energii w pracę. Bardzo silna pozycja egzergii w termodynamice wiąże się z jej właściwością pozwalającą na wychwycenie w bilansach egzergetycznych tych niedoskonałości procesów termodynamicznych, które są niewidoczne w bilansach energii. W transformacji energetyki silna pozycja egzergii wynika z jej potencjału objaśniającego istotę tej transformacji.

W tym kontekście jest ważne, że chociaż dla energetyka egzergia jest wielkością służącą do zmniejszania niedoskonałości termodynamicznej procesów cieplnych, to sami termodynamicy podkreślają: analiza egzergetyczna określa możliwości udoskonalania procesu cieplnego, jednak dopiero analiza ekonomiczna rozstrzyga o celowości zwalczania strat egzergii (19 praktycznych zasad zwalczania strat egzergii z poszanowaniem ekonomii – czyli z uwzględnieniem, faktu, że udoskonalanie procesu cieplnego zawsze wymaga nakładów inwestycyjnych – znalazło swoje sformułowanie w książce [3] napisanej przez twórcę polskiej szkoły egzergetycznej profesora J. Szarguta).

Powiązanie egzergii z ekonomią jest bardzo płodne. Z jednej strony nadaje ono paliwom status bogactw naturalnych (dobra rzadkie, nie będące w równowadze termodynamicznej ze składnikami powszechnymi w przyrodzie, w ekosystemie ziemskim). Z drugiej strony prowadzi do spostrzeżenia, że energia elektryczna praktycznie charakteryzuje się, obok energii kinetycznej, najwyższą egzergią. Wreszcie, że źródła OZE wykorzystują egzergię z innego świata (najogólniej przenoszoną przez strumień promieniowania słonecznego), mającego odniesienie nie w równowadze układu ziemskiego, a układu słonecznego.

W książce [3] wykład na temat egzergii rozpoczyna się od równania wiążącego egzergię wewnętrzną (w osłonie termodynamicznej) B_z z egzergią B strugi substancji przepływającej przez osłonę:

$$B_z = B - V(p - p_{ot}), \tag{5}$$

gdzie: V, p – objętość i ciśnienie w osłonie, p_{ot} – ciśnienie otoczenia (na zewnątrz osłony).

Składowymi egzergii B strugi ogólnie są: egzergia kinetyczna, potencjalna, termiczna (fizyczna i chemiczna), jądrowa, ładunku elektrycznego (energii elektrycznej), inne. Spadek egzergii termicznej strugi czynnika termodynamicznego w przemianie fizycznej lub chemicznej jest równy pracy maksymalnej wykonanej przez odwracalnie działającą maszynę przepływową wymieniającą ciepło z otoczeniem o temperaturze T_{ot} (przy tym pracę wykonaną przez układ/maszynę uważa się za dodatnią, praca wykonana na układzie ma znak ujemny). Przyrost egzergii termicznej ΔB_t równa się:

$$\Delta B_t = I_w - I_d = T_{ot}(S_w - S_d), \tag{6}$$

gdzie: I_w, I_d – entalpia odprowadzona z układu do źródła zewnętrznego i doprowadzona ze źródła zewnętrznego do układu, odpowiednio, S_w, S_d – entropia odprowadzona do źródła zewnętrznego i doprowadzona ze źródła zewnętrznego, odpowiednio.

Równanie na sprawność egzergetyczną η_B uogólnionego procesu termodynamicznego (uogólnionego w sensie: rozbudowanego, złożonego z wielu podprocesów różniących się jakościowo) ma, w postaci przedstawionej w książce [3], następującą postać:

$$\eta_B = \frac{B_{uż} - B_{sn} + L_{uż} + E_{eluż} + \Delta B_{źruż} + \Delta B_{uuż}}{B_N + L_N + E_{elN} + \Delta B_{źrN}}, \tag{7}$$

gdzie: $B_{uż}$ – użyteczna egzergia produktów użytecznych procesu, B_{sn} – egzergia surowców nieenergetycznych, $L_{uż}, E_{eluż}$ – użyteczna praca, użyteczna energia elektryczna uzyskana w procesie, $\Delta B_{źruż}$ – przyrost egzergii zewnętrznych źródeł ciepła, których ogrzewanie lub ochładzanie jest zadaniem procesu, $\Delta B_{uuż}$ – użyteczny przyrost egzergii układu, B_N – egzergia substancji napędowych (paliw), L_N, E_{elN} – praca napędowa, napędowa energia elektryczna, odpowiednio, $\Delta B_{źrN}$ – spadek egzergii zewnętrznego źródła ciepła napędowego.

Sprawność egzergetyczna opisana za pomocą równania (7) jest sprawnością wyłącznie eksploatacyjną. Czyli pomija ona egzergię potrzebną na wybudowanie układu technicznego (urządzenia roboczego, urządzenia napędowego, instalacji, infrastruktury). Jest jednak i tak bardzo pouczająca. W szczególności stanowi punkt wyjścia do wykazania w sposób formalny przewagi popytowego monizmu elektrycznego nad energetyką paliw kopalnych.

Mianowicie, równanie (7) odnoszące się do sprawności egzergetycznej zachęca do sformułowania pojęcia osiągalnej skuteczności transformacji energetycznej η_{TE}, wyrażającej unormowaną względną wartość redukcji zapotrzebowania energetycznego będącej wynikiem przejścia od stanu A (energia chemiczna paliw kopalnych, współczesne sposoby zaspakajania potrzeb energetycznych przez odbiorców) do stanu B (monizm elektryczny: energia elektryczna ze źródeł OZE, nowe sposoby zaspakajania potrzeb energetycznych przez prosumentów, w tym za pomocą pompy ciepła).

Prawa elektrotechniki w energetyce. Transformacja energetyki oznaczająca przejście od paliw kopalnych do odnawialnych źródeł energii zmienia relacje między termodynamiką i elektryką (elektrotechniką). W energetyce paliw kopalnych dominacja termodynamiki wynika w szczególności ze spalania paliw w kotłach oraz z procesów cieplnych zachodzących w maszynach energetycznych, u wytwórców i u odbiorców (prosumentów). W energetyce OZE dominacja elektryki wynika w szczególności z mono rynku energii elektrycznej OZE i z popytowego monizmu elektrycznego. W takim kontekście ma uzasadnienie hasłowy opis transformacji energetyki mówiący, że jest to zmiana energetyki termodynamicznej na elektrotechniczną. Oczywiście ten opis ma bardzo ograniczone znaczenie (musi być stosowany bardzo ostrożnie).

O ile prawa termodynamiki rządzą w energetyce sprawnością energetyczną urządzeń (źródeł wytwórczych, odbiorników) mającą fundamentalne znaczenie w wykorzystaniu paliw kopalnych, o tyle prawa elektrotechniki rządzą ograniczeniami technicznymi w sieciowych systemach elektroenergetycznych, które ograniczają konkurencję na rynku energii

elektrycznej, a tym samym ograniczają efektywność makroekonomiczną rynkowej alokacji zasobów energetycznych. Już tylko w takim kontekście porównawczym trzeba podkreślić, że w energetyce (traktowanej całościowo) uniwersalizm praw elektrotechniki (ich „odporność" na postęp technologiczny w całej elektryce) jest mniejszy niż praw termodynamiki. Jest to przyczyna, aby prawa elektrotechniki rozpatrywać w transformacji energetycznej w trzech aspektach.

Po pierwsze, w aspekcie współczesnych, „powierzchniowych" (w sensie rozciągłości powierzchniowej) systemów elektroenergetycznych prądu przemiennego. Po drugie, w aspekcie systemu prądy stałego, który ma przede wszystkim potencjał zrewolucjonizowania całego obszaru użytkowania energii elektrycznej, ale także transformacji systemów elektroenergetycznych prądu przemiennego w selektywne „liniowe" układy przesyłowe łączące morskie giga projekty wiatrowe i korytarze infrastrukturalno-urbanistyczne. Po trzecie, w aspekcie zelektronizowanych odbiorników i odbiorów elektrycznych, a także prosumenckich instalacji energetycznych (zaspakajających wszystkie potrzeby energetyczne prosumentów); w tym obszarze mają znaczenie zarówno wymagania teorii mocy elektrycznej jak i gwałtownie postępująca jego (obszaru) cyfryzacja.

W aspekcie współczesnych systemów elektroenergetycznych prądu przemiennego centralne znaczenie mają techniczne ograniczenia sieciowe: prądowe (gałęziowe/liniowe) oraz napięciowe (węzłowe); ich znaczenie polega na tym, że są one głównym czynnikiem ograniczającym konkurencję na rynku dostaw energii elektrycznej. Straciły natomiast na znaczeniu zagadnienia stabilności (statycznej oraz dynamicznej) pracy tych systemów, co wiąże się ze skróceniem czasów działania zabezpieczeń systemowych.

***

Zasada TPA i elektrotechnika na rynku energii elektrycznej. Zasada dostępu stron trzecich do sieci elektroenergetycznej (TPA) pobudziła konkurencję na rynku energii elektrycznej (trzecia zmiana strukturalna), ale też zapoczątkowała schyłek elektroenergetyki starego typu. Poniżej przedstawia się, przez pryzmat rozpływów sieciowych, istotę różnicy rachunku optymalizacyjnego w elektroenergetyce monopolistycznej i rynkowej (konkurencyjnej) w sposób ścisły, a nie tylko lingwistyczny.

Zadanie optymalizacyjne, polegające na wyznaczeniu ekonomicznego rozdziału obciążeń między źródła wytwórcze, zwane w elektroenergetyce monopolistycznej zadaniem optymalizacyjnym ERO, było w ciągu kolejnych dziesięcioleci (od lat 1950., aż do końca lat 1980.) najbardziej reprezentatywnym przykładem ekonomiki połączonych systemów wytwórczo-przesyłowych. Było zarazem punktem wyjścia do analizy węzłowych kosztów krańcowych w układach sieciowych na rynku energii elektrycznej, z konkurencją kreowaną przez zasadę TPA.

W zadaniu ERO zakłada się, że znany jest skład jednostek wytwórczych. Obliczenia wykonuje się dla ustalonej konfiguracji sieci przy założeniu stałej mocy odbieranej w poszczególnych węzłach. Ogólnie zadanie ERO polega na minimalizacji funkcji (8):

$$K(P_{\mathrm{G}}) = \sum_{i=1}^{n_G} k_i(P_{Gi}), \tag{8}$$

gdzie: $K(\mathbf{P_G})$ – całkowity koszt zmienny wytwarzania energii elektrycznej we wszystkich źródłach pracujących w systemie elektroenergetycznym, $k_i(P_{Gi})$ – nieliniowa charakterystyka/funkcja określająca koszt zmienny wytwarzania energii elektrycznej w źródle *i*, P_{Gi} – moc generowana przez źródło *i*, n_G – liczba źródeł wytwórczych pracujących w systemie.

Jeśli pominąć straty przesyłowe, a także ograniczenia wytwarzania mocy w źródłach oraz ograniczenia sieciowe, to zadanie minimalizacji funkcji (8) jest zadaniem z jednym ograniczeniem równościowym, wynikającym z bilansu mocy w połączonym systemie elektroenergetycznym określonym równaniem (9):

$$\sum_{i=1}^{n_G} P_{\mathrm{Gi}} - \sum_{i=1}^{n_W} P_{\mathrm{Li}} = 0, \tag{9}$$

gdzie: P_{Li} – moc czynna odbierana w węźle *i*, n_w – liczba węzłów w sieci.

Zadanie (9) można rozwiązać analitycznie, wykorzystując w tym celu odpowiednio utworzoną funkcję Lagrange'a.

W rzeczywistości zadanie minimalizacji funkcji (8) ma oprócz ograniczenia równościowego (9), uzupełnionego o straty mocy w sieci, trzy rodzaje ograniczeń nierównościowych. Są to ograniczenia: górne i dolne mocy źródeł wytwórczych, górne przepustowości linii (ograniczenia prądowe lub inaczej gałęziowe, dotyczące linii i transformatorów) oraz górne i dolne napięć w węzłach sieci elektroenergetycznej (ograniczenia napięciowe lub inaczej węzłowe). Do rozwiązania zadania z ograniczeniami nierównościowymi (metodą iteracyjną) wykorzystuje się twierdzenie Kuhna-Tuckera.

Z ekonomicznego punktu widzenia podstawowe znaczenie w zadaniu minimalizacji funkcji (8) mają charakterystyki/funkcje określające zmienne koszty wytwarzania energii elektrycznej w poszczególnych źródłach wytwórczych. W praktyce koszty te na ogół określało się w przeszłości dla każdego źródła na podstawie jego technicznej charakterystyki sprawności, wyznaczonej pomiarowo, i przeciętnej ceny jednostkowej paliwa. Jeszcze częściej minimalizację kosztu w równaniu (8) zastępowało się minimalizacją ilości zużytego paliwa. Generalną zasadą w monopolistycznej elektroenergetyce było przy tym stosowanie w rachunku optymalizacyjnym kosztów przeciętnych. Trzeba natomiast pamiętać, że rynek konkurencyjny działa w oparciu o koszty krańcowe.

Według klasycznej definicji krótkookresowy koszt krańcowy energii elektrycznej w węźle *i* (*Short Run Marginal Cost – SRMC*), także krótkookresowa cena węzłowa (*Locational Marginal Price – LMP*), jest pochodną całkowitego zmiennego kosztu wytwarzania energii w systemie względem zapotrzebowania węzłowego. W polskich uwarunkowaniach (struktura technologiczna źródeł wytwórczych) pojęcie „krótki okres" oznaczało dotychczas 15 minut (w systemie SOWE) lub jedną godzinę (w systemie WIRE). W związku z tym, w okresie 15-minutowym, lub w danej godzinie, miarą energii odebranej/wygenerowanej w węźle *i* może być stała moc czynna. Definicję krótkookresowego kosztu węzłowego można zatem zapisać za pomocą zależności (10):

$$LMP_i = SRMC_i = \frac{\partial K(P_{\mathrm{G}})}{\partial P_{\mathrm{Li}}}. \tag{10}$$

Krótkookresowy koszt krańcowy energii elektrycznej (krótkookresowa cena węzłowa) powinien zostać wyznaczony w optymalnym stanie pracy systemu elektroenergetycznego. W celu określenia wartości krótkookresowych kosztów węzłowych należy rozwiązać zadanie optymalizacji rozpływu mocy *OPF* minimalizujące funkcję celu (8) z uwzględnieniem ograniczeń. Po raz pierwszy (na świecie) związek między optymalnym rozpływem mocy a krótkookresowymi kosztami krańcowymi energii elektrycznej w węzłach sieci został opisany w [4]. Wymienieni autorzy przedstawili koncepcję zróżnicowanej czasowo i przestrzennie węzłowej ceny energii elektrycznej nazwanej *spot price of electricity*. Zastosowanie zadania *OPF* dla potrzeb hurtowego rynku energii elektrycznej funkcjonującego według polskiego modelu [5] wymagało modyfikacji funkcji celu (8) do postaci:

$$KCZ(\mathbf{P}_{Gp}, \mathbf{P}_{Gr}) = \sum_{i=1}^{n_G}\left[\sum_{p=m+1}^{m+n} C_{ip}P_{Gip} - \sum_{r=1}^{m} C_{ir}(P_{Gir}^{o} - P_{Gir})\right], \tag{11}$$

gdzie: $KCZ(\mathbf{P}_{Gp}, \mathbf{P}_{Gr})$ – całkowity koszt pokrycia zapotrzebowania w systemie SEE; $\mathbf{P}_{Gp} = [P_{Gip}; i = 1, 2,..., n_G; p = m+1,..., m+n]$; $\mathbf{P}_{Gr} = [P_{Gir}; i = 1, 2,..., n_G; r = 1, 2,..., m]$; P_{Gip} – zaakceptowana do produkcji moc z pasma p oferty przyrostowej jednostki wytwórczej i; P_{Gir}^{o} – moc oferowana w ramach pasma r oferty redukcyjnej jednostki wytwórczej i; P_{Gir} – zaakceptowana do produkcji moc z pasma r oferty redukcyjnej jednostki wytwórczej i; C_{ip}, C_{ir} – jednostkowa cena energii z jednostki wytwórczej i w paśmie p lub r oferty przyrostowej/redukcyjnej; m, n – liczba pasm oferty redukcyjnej/przyrostowej zadeklarowanych przez jednostkę wytwórczą i.

Zmiennymi decyzyjnymi podlegającymi optymalizacji w zadaniu *OPF* w warunkach rynkowych są wielkości mocy deklarowane przez poszczególne jednostki wytwórcze w pasmach ofert bilansujących, natomiast ceny oferowane w tych pasmach są parametrami zadania. Skład jednostek wytwórczych nie ulega zmianie w wyniku przeprowadzenia obliczeń. W zadaniu tym poszukuje się minimum funkcji (11) w obszarze określonym przez techniczne ograniczenia równościowe i nierównościowe.

Uwzględniając funkcję celu (11) oraz klasyczną definicję krótkookresowego kosztu krańcowego (10), w warunkach polskiego rynku energii elektrycznej, krótkookresowy koszt krańcowy w węźle i można zdefiniować za pomocą wzoru (12):

$$LMP_i = SRMC_i = \frac{\partial KCZ(P_{Gp}, P_{Gr})}{\partial P_{Li}}. \tag{12}$$

Krótkookresowy koszt węzłowy (9) można rozłożyć na składniki o prostej interpretacji fizykalnej. Są to: koszt węzłowy energii elektrycznej czynnej w węźle odniesienia, koszt strat sieciowych (od przepływu mocy pozornych), koszt ograniczeń gałęziowych/prądowych i koszt ograniczeń węzłowych/napięciowych. W formie analitycznej składniki te mają postać:

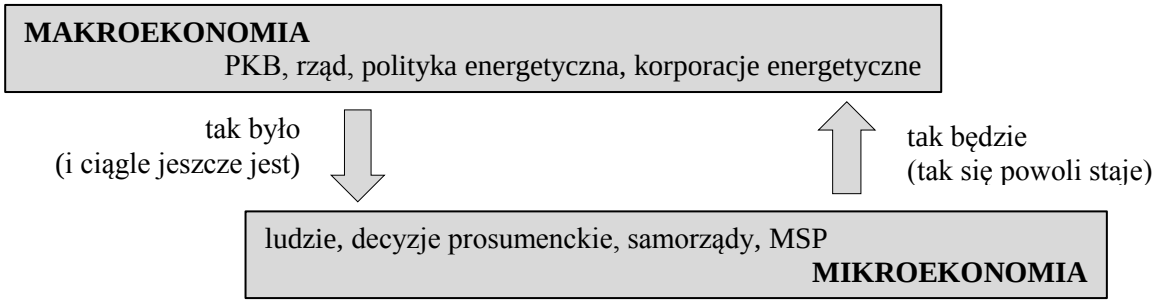
$$LMP_i = \left(1 + \frac{\partial P_{str}}{\partial P_{Li}}\right) LMP_b + \frac{\partial Q_{str}}{\partial Q_{Li}} LMP_{qb} + \sum_{g=1}^{n_g} \mu_g^{max} \frac{\partial S_g}{\partial P_{Li}} + \sum_{j=1}^{n_w}\left(-\mu_{Uj}^{min} + \mu_{Uj}^{max}\right)\frac{\partial U_j}{\partial P_{Li}}, \tag{13}$$

gdzie: LMP_b, LMP_{qb} – cena węzłowa energii czynnej i biernej w węźle odniesienia, P_{str}, Q_{str} – straty mocy czynnej i biernej w sieci, S_g – przepływ mocy pozornej w gałęzi g, U_j – moduł napięcia w węźle j, μ – wektor mnożników Kuhna-Tuckera dla ograniczeń nierównościowych, n_g – liczba gałęzi.

Krótkookresowe koszty/ceny węzłowe, stanowią bardzo silne sygnały lokalizacyjne i znacznie polepszają uwarunkowania dla konkurencji w połączonych systemach. W praktyce oznacza to między innymi przenoszenie wytwarzania na niższe poziomy napięciowe, bliżej odbiorców. Trzeba przy tym podkreślić, że koncepcja konkurencji w oparciu o zasadę TPA i rozwój metodyki kosztów/cen węzłowych na świecie zbiegły się w czasie z gwałtownym rozwojem gazowych technologii kogeneracyjnych (na gaz ziemny). Dzięki temu trend przenoszenia wytwarzania bliżej odbiorców, u których są odbiory ciepła, niezwykle się wzmocnił (kryzys kalifornijski w latach 2000-2001, który można było rozwiązać efektywnie za pomocą szokowego wzrostu kogeneracji gazowej, znacznie się do tego przyczynił).

Przedstawiony model funkcjonowania cen krańcowych na rynku hurtowym zdecydowanie nie jest wystarczający dla potrzeb rynku wschodzącego (1) energii elektrycznej. To oznacza, uwzględniając istniejący system taryfowy na rynku odbiorców końcowych, szokowy charakter koniecznej transformacji rynkowej. Przykładowo, nie może być już praktycznie wątpliwości, że standardem w grafikowaniu rynku wschodzącego (1) powinny być profile 5-minutowe. Przejście od taryf (cen przeciętnych) do cen krańcowych 5-cio minutowych jest warunkiem przełamania monopolu energetyki WEK, który w gruncie rzeczy jest „śmiercią entropijną" rynku.

Odwrócenie kierunku wymuszeń społeczno-ekonomicznych. Chodzi o odwrócenie wymuszeń „od makroekonomii do mikroekonomii" (dotychczas dominujących) na wymuszenia „od mikroekonomii do makroekonomii". Oczywiście, dotychczasowy kierunek wymuszeń kształtował się razem z efektem skali i paramilitarnymi cechami, które ogólnie zdominowały energetykę odchodzącą już do historii, a elektroenergetykę w szczególności. Kierunek ten stanowił dotychczas nieprzezwyciężalną barierę przejścia (w całej energetyce) od rozwoju naśladowczego do rozwoju w trybie innowacji przełomowych (oznaczających zmianę formuły funkcjonowania wielkich rynków, fundamentalnych dla makroekonomii).



Rys. 4. Uproszczony opis odwróconego kierunku wymuszeń społeczno-ekonomicznych

Podkreśla się, że odwrócenie kierunku oddziaływania w obszarze energetyki na kierunek od mikroekonomii do makroekonomii nie byłoby możliwe bez synergii wielu okoliczności. Najważniejszymi z tych okoliczności są: rozwój mało- i mikro-skalowych technologii wytwórczych energii elektrycznej (w tym w szczególności fotowoltaicznych), rozwój energoelektroniki i teleinformatyki umożliwiających zarządzanie gospodarką energetyczną na

poziomie prosumenckim, a wreszcie indywidualizacja preferencji ludzi w powiązaniu ze wzrostem potencjału prosumenckiej aktywności i wzrostem społecznej wydajności pracy.

Transformacja energetyki objawiająca się odwróceniem kierunku oddziaływania przyspieszy generalny proces zmian cywilizacyjnych, które już wyraźnie się ujawniły. Skutkiem są: majątek ludzi vs PKB, ujemne stopy procentowe banków centralnych vs wzrost ilości pieniądza fiducjarnego, powszechność hazardu finansowego vs koncentracja kapitału przez najbogatszych ludzi świata (zapisów w bilansach przedsiębiorstw, dokonywanych „obok", bez związku z majątkiem materialnym).

Paradygmaty

W aspekcie metody nowej energetyki i wpływu jaki ma na nią odwrócenie kierunku oddziaływania makroskopowego w sferze społeczno-ekonomicznej (na oddziaływanie: mikroekonomia → makroekonomia) podkreśla się, że zasady termodynamiki są uogólnieniem wyników bardzo dużej liczby badań (obserwacji, eksperymentów) nad makroskopowymi własnościami ciał.

Według takiej perspektywy zerowa zasada termodynamiki oznacza prawo równoważności stanów układów termodynamicznych (z tej zasady wynika istnienie temperatury empirycznej). Pierwsza zasada termodynamiki oznacza prawo zachowania energii dla układów termodynamicznych. Druga zasada termodynamiki oznacza prawo stałego wzrostu entropii (określa kierunek w którym mogą samorzutnie przebiegać procesy termodynamiczne). Trzecia zasada termodynamiki oznacza prawo dążenia entropii do zera, gdy wartość temperatury bezwzględnej tego układu dąży do zera. Przy tym na gruncie termodynamiki statystycznej (operującej metodami dedukcyjnymi) coraz liczniej są sygnalizowane odstępstwa od zasad termodynamiki klasycznej (są to odstępstwa w świecie mikroskopowym).

Nie ma wątpliwości, że perspektywa termodynamiczna ma duże znaczeniu dla budowy metody nowej energetyki. Powiązanie tej perspektywy z całą przestrzenią pojęciową tripletu paradygmatycznego umożliwia nazwanie każdego z trzech paradygmatów i jego hasłowy opis (tab. 1, a także sformułowane wyjaśnienia i komentarze rozsiane w artykule) i stworzenie wyjściowej listy synonimów nazw. Podkreśla się jednak, że triplet paradygmatyczny jest w gruncie rzeczy bardzo eklektyczny. Naturalnie, na obecnym etapie byłoby zbyt ryzykowne opowiedzenie się za tym, że w miarę konsolidowania się metody nowej energetyki triplet będzie „twardniał", albo będzie się „rozmiękczał" (stawał się jeszcze bardziej eklektyczny); na to jest jeszcze za wcześnie.

Można natomiast stwierdzić, że pożyteczne jest wykorzystanie do konsolidacji nowej metody energetyki „kłopotów" termodynamiki (termodynamika makroskopowa klasyczna i mikroskopowa statystyczna), ekonomii (kryzys paradygmatu wywodzącego się z doktryny neoklasycznej, w której dominuje podejście makroekonomiczne, oddające stan równowagi ogólnej opisanej za pomocą modeli zagregowanych i statycznych) oraz elektrotechniki (niewydolność klasycznych systemów AC w elektroenergetyce mająca przyczynę w źródłach wytwórczych OZE wymagających szokowego wzrostu zastosowań energoelektroniki; potrzeba przejścia do systemów hybrydowych AC-DC i przebiegów odkształconych).

Paradygmat prosumencki (tab. 1). Proponowana lista synonimów dla paradygmatu prosumenckiego, to paradygmat: anty-korporacyjny, pro-efektywnościowy, pro-edukacyjny, behawiorystyczny, …

Paradygmat egzergetyczny (tab. 1). Proponowana lista synonimów, to paradygmat: anty-entropijny (opóźnianie wzrostu entropii w czasie), proefektywnościowy, transformacji energetyki termodynamicznej w elektrotechniczną, …

Paradygmat wirtualizacyjny (tab. 1). Proponowana lista synonimów, to paradygmat: anty-monopolowy, wykorzystania sieci nN-SN, zasady TPA+, mikrotransakcji, prymatu mikroekonomii nad makroekonomią, wynikania makroekonomii z mikroekonomii, …

Część III
TRANSFORMACJA DO MONIZMU ELEKTRYCZNEGO

Stawia się hipotezę, że najsilniejszym narzędziem praktycznej realizacja transformacji energetyki od stanu A do stanu B jest rynek energii elektrycznej prowadzący do monizmu elektrycznego, który w praktyce oznacza efektywne zarządzanie procesami przetwarzania energii elektrycznej (substratu) w komplet niezbędnych prosumenckich usług energetycznych (oświetleniowych, multimedialnych, komputerowych, pralniczych, ...; usług zapewniających komfort środowiskowy, …; usług transportowych, …; usług zapewniających funkcjonowanie przemysłu; …).

Oczywiście, na rynek ten muszą się składać mechanizmy zapewniające interakcje dwóch rodzajów. Po pierwsze, interakcje przedmiotowe pomiędzy obecnymi trzema sektorowymi rynkami energetycznymi energetyki WEK (rynki: energii elektrycznej, ciepła i paliw transportowych). Po drugie, interakcje podmiotowe pomiędzy energetyką WEK (całą) i EP oraz NI. Jest zrozumiałe, że warunkiem skuteczności nowego rynku energii elektrycznej (polegającej na wytworzeniu stanu monizmu elektrycznego) jest infrastruktura hardwarowo-softwarowa pomiędzy poza-prosumenckimi źródłami energii elektrycznej i prosumenckim zapotrzebowaniem na energię elektryczną, umożliwiająca „umaszynowienie" rynku energii elektrycznej [6,7].

***

Praktyczne przejście do nowego rynku energii elektrycznej. Z tripletu paradygmatycznego transformacji energetycznej wynikają wprost ramy ustalania praktycznych rozwiązań na rynku energii elektrycznej stanowiącym główną siłę sprawczą kształtującą trajektorię transformacji energetycznej od stanu A do stanu B. W tym kontekście podkreśla się, że (ewolucyjna) transformacja energetyczna nie jest mechanicznym odtwarzaniem programu zawartego w warunkach początkowych (stan A). Stanowi natomiast proces twórczy, w którym jest miejsce na kreację, jednak za pomocą mechanizmów rynkowych (decyzji mikroekonomicznych), a nie za pomocą polityki energetycznej narzucanej z poziomu makroekonomicznego (władztwa nadbudowy, która utraciła jednak kompetencje).

Dlatego stanów A i B w transformacji energetyki nie da się bezpośrednio traktować w kategoriach równania stanu termodynamicznego, które jest opisem tego stanu

wykorzystującym trzy parametry termiczne: ciśnienie, temperaturę i objętość właściwą (oczywiście, tylko dwa z nich są niezależne); przy tym kardynalną właściwością równania stanu jest to, że nie jest ono wrażliwe na trajektorie przejścia układu z jednego stanu w drugi. Z drugiej strony pożyteczne jest szukanie inspiracji w działaniu równania stanu do potrzeb kształtowania trajektorii transformacyjnej energetyki między stanami A i B.

Mianowicie, stan B (horyzont 2050, pełna reelektryfikacja OZE, monizm elektryczny) jest w obecnej rzeczywistości technologicznej, ekonomicznej i społecznej dostatecznie odległy, aby stwierdzić, że niezależnie od trajektorii zostanie on osiągnięty. Tablica praktycznych współczynników transformacji energetycznej do monizmu elektrycznego w pierwszym podejściu (wymagającym surowej weryfikacji) jest bardzo prosta, tab. 2. Centralną kategorią monizmu elektrycznego jest energia użyteczna $E_{uż}$ w postaci energii elektrycznej ze źródeł OZE potrzebna do zaspokojenia wszystkich prosumenckich potrzeb energetycznych.

Tab. 2. Tablica praktycznych (szacunkowych) współczynników transformacji energetycznej do monizmu elektrycznego

Rynek energetyczny		„czynnik" napędowy	jednostka „wiążąca"	oszacowanie	
				wzór	liczbowe
energia elektryczna		ludność, gospodarka	kWh/(os., PKB)	(-)	1
ciepło	grzewcze, CG	ludność, mieszkalnictwo	kWh/m^2	$\frac{E_{PH}}{E_g} \cdot \frac{1}{COP}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} = 0{,}1$
	CWU	ludność	kWh/os.	$\frac{1}{COP}$	$\frac{1}{3} = 0{,}3$
transport		ludność, transport	kWh/sam.	$\frac{\eta_s}{\eta_{EV}}$	$\frac{0{,}2}{0{,}6} = 0{,}3$

Celem powiązania energii użytecznej $E_{uż}$ (wyrażonej w jednostkach mianowanych, w praktyce w: MWh, GWh, TWh) ze współczynnikami w tab. 2 pożyteczne jest wprowadzenie do modelowania trajektorii transformacyjnej bilansów energetycznych unormowania względnej (indeks górny $*$) energii użytecznej, za pomocą współczynnika struktury bilansu energetycznego (14) energii końcowej E_k, właściwego dla każdego charakterystycznego przypadku (np. dla domu jednorodzinnego, dla kraju, dla świata) w stanie A:

$$w = \sum_{i=1}^{4} w_i = 1, \tag{14}$$

gdzie: $w_1 = w_{el}$ – udział względny energii elektrycznej w bilansie, $w_2 = w_{CG}$ – udział względny ciepła grzewczego w bilansie, $w_3 = w_{CWU}$ – udział względny ciepła grzewczego wykorzystywanego do produkcji ciepłej wody użytkowej, $w_4 = w_t$ – udział względny energii chemicznej paliw transportowych.

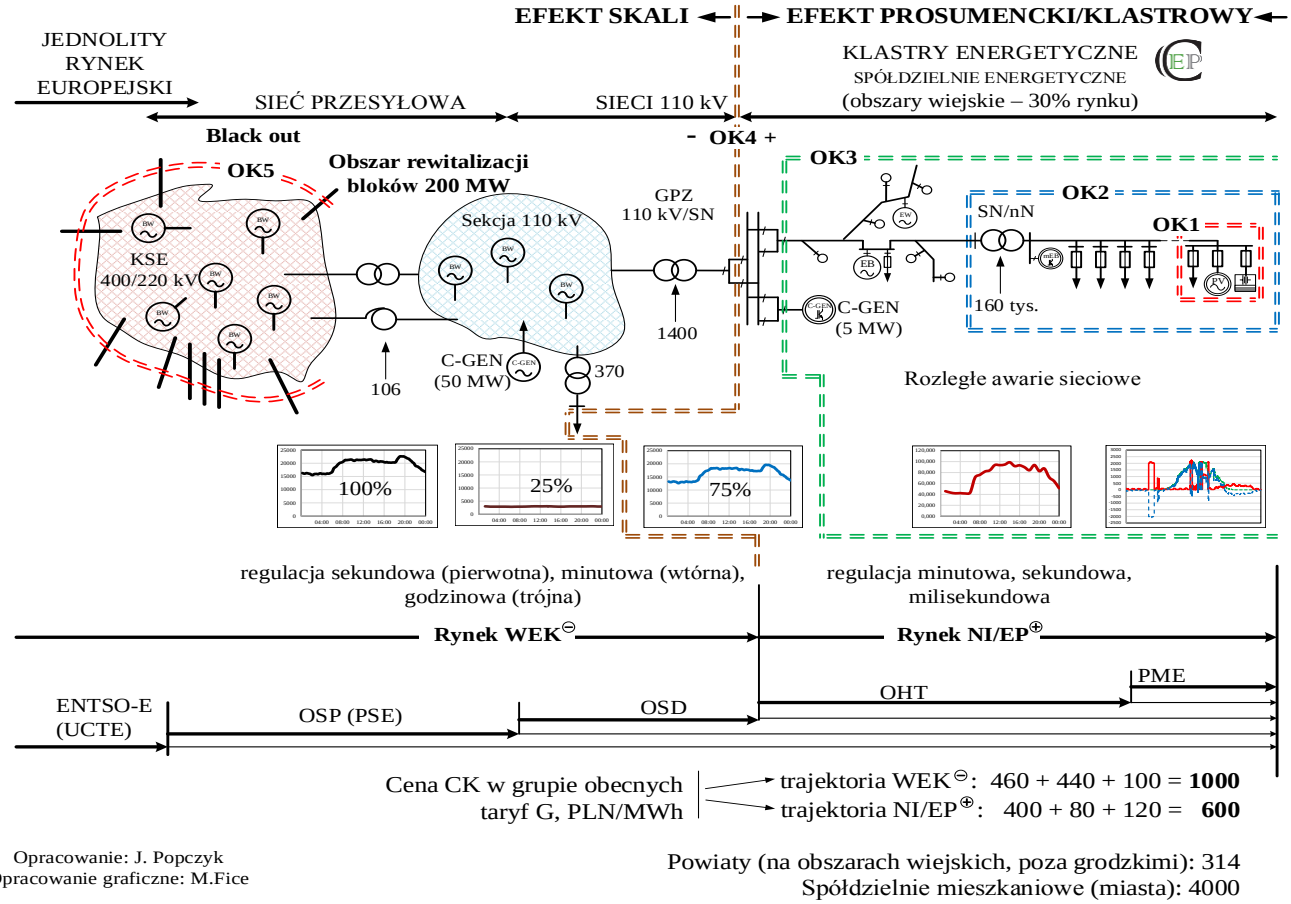
Korzystając ze współczynników (14) oraz ze współczynników zapisanych w tab. 2 można energię użyteczną $E_{uż}^{B*}$ w stanie B ekwiwalentną energii (unormowanej) końcowej E_k^{A*} w stanie A wyrazić za pomocą wzoru (15):

$$E_{uż}^{B*} = E_k^{A*}\left(w_{el} + w_{CG}\cdot\frac{E_{PH}}{E_g}\cdot\frac{1}{COP} + w_{CWU}\cdot\frac{1}{COP} + w_t\cdot\frac{\eta_s}{\eta_{EV}}\right). \qquad (15)$$

Równanie (15) jest niezależne od czasu, czyli od trajektorii transformacyjnej. Zależne jest jedynie od stanów: przed-transformacyjnego A i po-transformacyjnego B. Czyli równanie to jest swoistego rodzaju równaniem stanu. W zagadnieniach praktycznych jest wygodnie przyjąć, że w stanie przed-transformacyjnym A energia $E_k^{A*} = 1$ (jest to zarazem bardzo naturalne podejście metodyczne). Wówczas struktura w, wzór (14), staje się zmienną sprzężoną napędową (tylko od tej struktury zależy energia użyteczna $E_{uż}^{B*}$ w stanie po-transformacyjnym B.

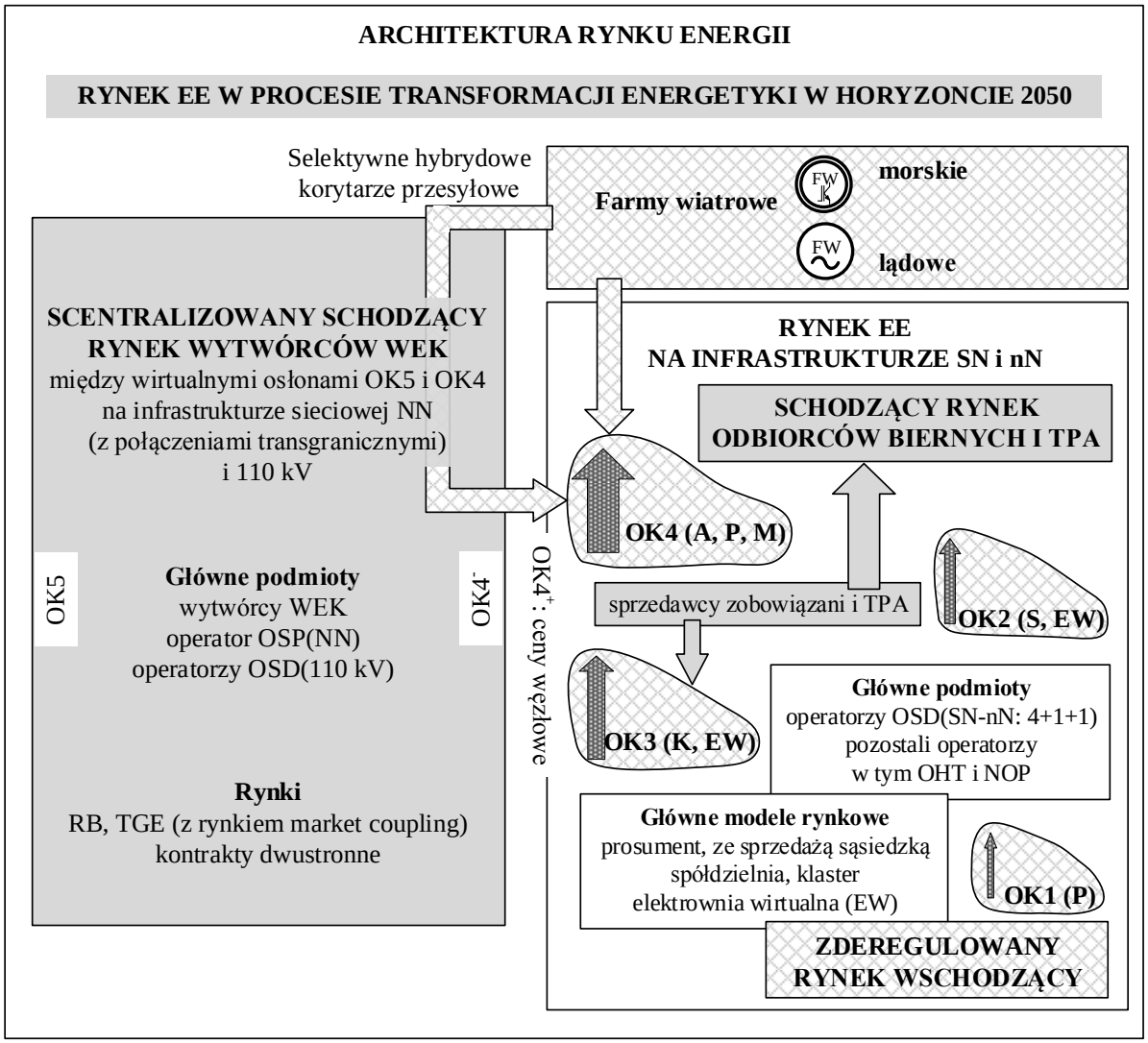
Architektura transformacyjnego rynku energii elektrycznej

Proponowana architektura nowego runku energii elektrycznej (stan A procesu transformacyjnego) ma u podstaw zgodność z infrastrukturą techniczną KSE, rys. 5. Zgodność ta, praktycznie wyrażająca się przez system osłon kontrolnych OK1 do OK5, jest kardynalnym warunkiem poprawności metodycznej architektury; osłony kontrolne służą generalnie do wydzielenia charakterystycznej części infrastruktury elektroenergetycznej (IEE) umożliwiającej funkcjonowanie rynku energii elektrycznej.



Rys. 5. Synteza zagadnień związanych z przebudową systemu operatorskiego w KSE od scentralizowanego (OSP, OSD) do rozproszonego (zwłaszcza w osłonach OK1 do OK2)

Podstawą operacjonalizacji proponowanego nowego rynku energii elektrycznej jest architektura przedstawiona w skrajnym uproszczeniu na rys. 6. Operacjonalizacja nowej architektury musi zapewnić całkowita przebudowę cenotwórstwa. Na rynku schodzącym (w obrębie całego KSE) chodzi o przebudowę w kierunku cenotwórstwa CCR (cenotwórstwo czasu rzeczywistego), przeznaczonego zarówno dla odbiorców „biernych" jak i korzystających z zasady TPA. Na rynku wschodzącym, funkcjonującym na infrastrukturze SN/nN, rynek (1), i na hybrydowych układach przesyłowych, rynek (2), jest to przebudowa w kierunku zróżnicowanych systemów cenotwórstwa uwzględniających lokalne uwarunkowania (zróżnicowane modele rynku rozproszonego).



Rys. 6. Architektura runku energii elektrycznej w procesie transformacji w horyzoncie 2050, z dwoma rynkami przeciwbieżnymi: schodzącym i wschodzącym

W wypadku rynku wschodzącego (1) podstawowe znaczenie ma przy tym hipoteza robocza o istnieniu wielkiego potencjału skalowalności rozwiązań na wszystkich potencjalnych platformach tego rynku (klaster energii, spółdzielnia energetyczna, elektrownia wirtualna, wirtualny minisystem elektroenergetyczny). Oczywiście, skalowalność jest ściśle powiązana z właściwościami energetyki prosumenckiej. Mianowicie, z jej podatnością na fundamentalną

segmentację, tworzącą dobre uwarunkowania do unifikacji rozwiązań energetycznych dla każdego z segmentów. Znaczenie systemu osłon kontrolnych OK wynika z faktu, że integruje on prosumentów i wszystkie potencjalne platformy rynku wschodzącego (1) z infrastrukturą KSE, w sposób przedstawiony na rys. 5.

Między infrastrukturą KSE przedstawioną na rys. 5 i architekturą rynku energii elektrycznej przedstawioną na rys. 6 musi być zbudowana inteligentna infrastruktura *hardwarowo-softwarowa* pozwalająca na bezpieczne (technicznie) współużytkowanie sieci nN-SN i na silną konkurencję (w środowisku jednoskładnikowych, bieżących cen krańcowych). Chodzi o infrastrukturę *hardwarowo-softwarową* w postaci sieciowych terminali dostępowych (rozbudowywaną w ramach zasady TPA+) będącą interfejsem łączącym rynki (obecnie): schodzący i wschodzący (1), drugi Raport Cyklu BPEP [2].

Architektura „otwarcia" przedstawiona na rys. 6 ma na celu „rozhermetyzowanie" obecnie wszechwładnie obowiązującego myślenia o rynku energii elektrycznej kategoriami energetyki WEK (choćby taką jaką jest 7 milionów umów o dostawę energii elektrycznej zawieranych indywidualnie przez gospodarstwa domowe w budynkach wielorodzinnych zarządzanych przez spółdzielnie i wspólnoty mieszkaniowe). Przy tym ochronę – z jednej strony biernych odbiorców, a z drugiej samej energetyki WEK – przed grożącym Polsce kryzysem, którego destrukcyjnych skutków nie da się już uniknąć. Architektura ta w kolejnych miesiącach (nie latach) powinna się stać przedmiotem specjalistycznej dyskusji w trybie kryzysowym.

Trajektoria transformacyjna

Najskuteczniejszą praktyczną weryfikacją poprawności teoretycznej paradygmatycznego tripletu jest efektywność jego działania w procesie transformacji (całej) energetyki WEK w nową rzeczywistość energii użytecznej. Przy tym musi to być weryfikacja, która będzie się odbywać na dwóch współzależnych płaszczyznach. Na pierwszej triplet musi tworzyć warunki budowy efektywnej architektury rynkowej takiej, która (najpierw) pobudzi dynamiczny rozwój mono rynku OZE. Po to, aby doprowadzić do zaniku (w sensie ewolucyjnym, nie rewolucyjnym) energetyki WEK (paliw kopalnych). Na drugiej płaszczyźnie musi natomiast dokonywać się degradacja mono rynku energii elektrycznej OZE, po to aby tworzyła się przestrzeń rozwojowa dla rynków dóbr inwestycyjnych i usług ukierunkowanych na energetykę prosumencką, w której energia użyteczna będzie przekształcana w zaspakajanie prosumenckich potrzeb energetycznych. Będzie to oznaczało sytuację podobną do pierwotnej elektryfikacji z przełomu XIX i XX wieku (w Polsce z okresu międzywojennego). Mianowicie, wtedy nie było elektroenergetyki. Na początku byli przedsiębiorcy przemysłowi, którzy za pomocą energii elektrycznej (pozyskiwanej z własnych źródeł wytwórczych) budowali swoją branżową przewagę konkurencyjną.

***

Ekwiwalentowanie osłon kontrolnych i potrzeba odwrócenia jego kierunku (propozycja dla Polski). Proces „przenoszenia" wytwarzania energii elektrycznej na poziom prosumencki, zapoczątkowany na wielką skalę przez rozwój źródeł PV, ujawnił nieadekwatność modelu biznesowego energetyki WEK do współczesnych wymagań i obnażył jej całkowitą niezdolność do odpowiedzi na wyzwanie. Skutek jest typowy dla takich sytuacji. Mianowicie,

brak zdolności energetyki WEK do przedłożenia oferty rynkowej energetyce EP-NI powoduje, że ta druga przechodzi na pozycję dawcy oferty dla pierwszej.

Na świecie polega to na tym, że energetyka EP-NI w szybkim tempie uczy się, że ma już przewagę rynkową nad energetyką WEK. Stąd wynika konieczność zmiany „kierunku" ekwiwalentowania osłon kontrolnych. Mianowicie, podstawą oferty sprzedaży-zakupu wystawianej na rynku przez energetykę WEK powinno być rozpoznanie z jej strony ekwiwalentów osłon kontrolnych energetyki EP-NI. Jeśli jednak inicjatywę przejmuje energetyka EP-NI, to właśnie ona musi mieć na swoich osłonach kontrolnych rozpoznane ekwiwalenty rynkowe energetyki WEK.

Spektakularnym przykładem może być proces rozpoznawania ekwiwalentu rynkowego energetyki WEK na osłonach OK3, rys. 5. Generalnie, są to osłony wirtualne klastrów energii (na obszarach wiejskich). Osłony OK3 lokują się w fizycznych osłonach OK4, i obejmują fizyczne osłony OK2 oraz OK1. W środowisku, które tworzą Cykle Raportów BŹEP [1] i BPEP [2]) stabilnym (ugruntowanym) horyzontem kończącym transformację elektroenergtyki na obszarach wiejskich jest w Polsce horyzont 2040. Jeśli obszary wiejskie mają udział w krajowym rynku energii elektrycznej wynoszący 30%, a horyzontem transformacji europejskiej elektroenergetyki jest horyzont 2050, to jest bardzo racjonalne przyjęcie w Polsce ram dla procesu transformacyjnego w postaci stanów A i B.

W rzeczywistości trajektoria transformacyjna A→B jest napędzana rachunkiem ekonomicznym, głównie inwestycjami. Egzekutorem rachunku ekonomicznego powinien być dobrze działający rynek energii elektrycznej. Wskazówki do zaprojektowania dobrej architektury rynku i dobrych mechanizmów rynkowych powinny pochodzić od funkcji kary zbudowanej na trajektorii transformacyjnej, jako funkcji czasu. Przekształcenie, równania (15), wszystkich jego czterech składników, w funkcję czasu jest wielkim wyzwaniem.

Przy tym to stwierdzenie nie dotyczy (przynajmniej na etapie rozpoznawczym) pierwszego składnika równania (18). Mianowicie, racjonalna jest hipoteza, że istnieje jeszcze istotny potencjał poprawy efektywności tradycyjnego użytkowania energii elektrycznej (użytkowania w dotychczasowym zakresie, z wykorzystaniem innowacji przyrostowych). Zatem dobrym przybliżeniem opisującym transformację energetyki, uwzględniającym czasowy wzrost efektywności użytkowania energii elektrycznej (w tradycyjnym obszarze użytkowania) oraz redukcję start sieciowych i potrzeb własnych elektrowni w związku z transformacją rynku schodzącego w rynki wschodzące (1) i (2) jest równanie (16):

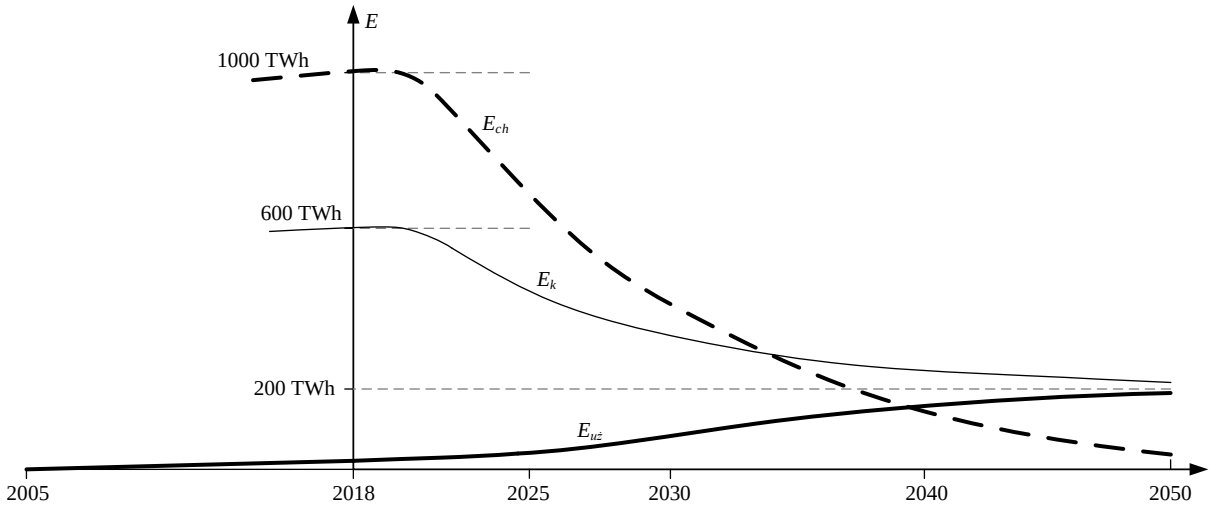
$$E_{uż}^{B*} = E_k^{A*}\left\{w_{el}[(1-p_e)\cdot(1-p_{s-e})]^{t_{A\to B}} + w_{CG}\cdot\frac{E_{PH}}{E_g}\cdot\frac{1}{COP} + w_{CWU}\cdot\frac{1}{COP} + w_t\cdot\frac{\eta_s}{\eta_{EV}}\right\}, \quad (16)$$

gdzie: p_e – roczny wskaźnik wzrostu efektywności użytkowania energii elektrycznej przez odbiorców (prosumentów), p_{s-e} – roczny wskaźnik redukcji strat sieciowych i potrzeb własnych elektrowni (z tytułu redukcji rynku schodzącego energii elektrycznej).

Przyjmując dla kraju roczną poprawę efektywności $p_e = 7‰$ oraz roczną redukcję strat sieciowych i potrzeb własnych elektrowni $p_{s-e} = 7‰$, a ponadto wskaźniki transformacji energetyki według tab. 2, i uwzględniając rzeczywistą krajową strukturę energii końcowej

w stanie A ($w_{el} = \frac{170\,TWh}{600TWh}, w_{CG} = \frac{180\,TWh}{600\,TWh}, w_{CWU} = \frac{50\,TWh}{600\,TWh}, w_t = \frac{200\,TWh}{600\,TWh}$) otrzymuje się: $E_{uż}^{B*} = 0{,}33\,E_k^{A*}$.

Uzyskany wynik jest spójny z danymi przedstawionymi na rys. 2 (podkreśla się przy tym, że wynik i dane są silnie, ale nie całkowicie, zależne). Równanie (16), łącznie z rys. 2 stanowią bardzo dobrą przesłankę do jakościowo-ilościowego zobrazowania trajektorii transformacyjnej polskiej energetyki w całości w horyzoncie 2050, rys. 7; transformacja rynków ciepła i paliw transportowych jest w tej trajektorii „zaszyta" za pomocą „równania stanów" (15).



Rys. 7. Trajektoria transformacyjna polskiej energetyki do stanu B (monizmu elektrycznego)

Wynik uzyskany za pomocą równania (16) i trajektoria transformacyjna pokazana na rys. 7 są szokujące. Tym ważniejsza jest ich krytyczna analiza przez pryzmat „wydolności" systemów politycznego, gospodarczego i społecznego (paradygmaty pierwszy i drugi) w działaniach na rzecz transformacji A→B. W wypadku Polski istnieje szczególna potrzeba krytycznej analizy w tym kontekście dwóch 30-letnich okresów poprzedzających 30-letni okres transformacji A→B. Pierwszym z nich jest okres 1960-1989, czyli okres skrajnej centralizacji energetyki (działalności ministerstw, zjednoczeń i wspólnot energetycznych) oraz ogromnego placu budowy bloków węglowych 200-500-360 MW, bloków jądrowych i sieci 220-400-750 kV, a na koniec ciężkiego kryzysu (Wspólnota Energetyki i Węgla Brunatnego zlikwidowana, budowa elektrowni jądrowej Żarnowiec przerwana, linia 750 kV wyłączona z eksploatacji, …). Drugim jest okres 1990-2020, rozpoczynający się strukturalną reformą decentralizacyjno-rynkową 1990-1995 (powiązaną z reformą ustrojową państwa) i włączeniem KSE w europejską przestrzeń bezpieczeństwa elektroenergetycznego, a następnie przekształcający się pełzająco w dominujące grupy energetyczne, w wielki plac budowy bloków węglowych 400-800-900-1100 MW, w gigantyczny program energetyki jądrowej, i na koniec w ciężki kryzys, do zarządzania którego (za pomocą blokowania transformacji) utworzone zostało ministerstwo energii.

Ma także znaczenie, chociaż z natury rzeczy mniejsze, 40-letni okres 1920-1960, w którym budowany był pierwszy polski regionalny, mianowicie pomorski, system

elektroenergetyczny (początek budowy, to lata 1920.) oraz infrastruktura elektroenergetyczna okręgu COP (początek budowy, to lata 1930.).

Skuteczne przejście ze stanu A do stanu B wymaga prawidłowej diagnozy różnic modelu rozwojowego elektroenergetyki na poszczególnych, historycznych etapach. Nawet bardzo uproszczona analiza w tym zakresie potwierdza użyteczność proponowanego tripletu paradygmatycznego przenoszącego w horyzoncie 2050 ciężar opisu problematyki energetycznej z metody „dedukcyjnej" na „indukcyjną".

ZAKOŃCZENIE

Rozpędzająca się globalna transformacja energetyki – dla Polski zobrazowana (tylko potencjalnie) poprzez równanie (16) i trajektorię transformacyjną przedstawioną na rys. 7 (krzywe $E_{ch,}\ E_{k,}\ E_{uż}$) – stanowi coś znacznie więcej niż reelektryfikację OZE wynikającą z polityki klimatyczno-energetycznej. Dlatego tak ważne jest dotarcie do jej istoty i zbudowanie nowej metody problematyki energetycznej (świadomie nie używa się tu już nazwy „energetyka"). Zaproponowany w artykule eklektyczny triplet paradygmatyczny może stanowić punkt wyjścia w długim procesie konsolidacji metody.

Z teoretycznego punktu widzenia ważne będą między innymi poszukiwania właściwej struktury równania (16), jego członu objętego nawiasem $\{\ldots\}$. Mianowicie, struktury równoważącej: wymagania metodologiczne matematycznego opisu transformacji, potencjał dostępnych technik obliczeniowych oraz „demokratyzację" dostępu zasobów ludzkich do problematyki (narastającą falę zaangażowania ludzi, niezależnie od faktu, że problematyka ciągle jeszcze jest niezwykle hermetyczna). Oczywiście, powinna to być ponadto struktura, „intuicyjnie przekładalna" na architekturę i mechanizmy rynku energii elektrycznej.

Z praktycznego punktu widzenia ważna będzie implementacja do struktury równania (16) modeli podatności cenowej popytowo-podażowej energii elektrycznej, ale w całkowicie nowy sposób. Mianowicie, musi to być podatność cenowa w środowisku cen krańcowych czasu rzeczywistego na osłonach kontrolnych między rynkami energii elektrycznej: schodzącym WEK oraz rynkami wschodzącymi (1) i (2) energetyki EP-NI (co jest zupełnie czym innym niż elastyczność cenowa energii elektrycznej w dotychczasowym zrozumieniu).

Źródła

Dwa Cykle Raportów nt. *Transformacja energetyki w rynki energii użytecznej OZE – perspektywa 2050*. https://www.cire.pl, http://klaster3x20.pl

[1] Popczyk J., Bodzek K., Fice M., Kiluk S., Michalak J., Wójcicki R.: Cykl Raportów BŹEP: Dwanaście Raportów Biblioteki Źródłowej Energetyki Prosumenckiej, datowanych: październik 2017 – styczeń 2018.

[2] Popczyk J., Bodzek K., Fice M., Dębowski K., Pilśniak A., Sztymelski K., Wójcicki R.: Cykl Raportów BPEP: Zaplanowanych dwanaście Raportów Biblioteki Powszechnej Energetyki Prosumenckiej, datowanie pierwszych ośmiu: luty 2018 –lipiec 2018.

Ponadto:

[3] Szargut J. *Termodynamika techniczna.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2011.

[4] Caramanis M.C., Bohn R.E., Schweppe F.C. (*Optimal Spot Pricing: Practice and Theory*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1982.

[5] Popczyk J. *Postprzemysłowa energetyka – piąta fala innowacyjności.* Wykład inauguracyjny w Politechnice Śląskiej, 65 Inauguracja, październik 2009 (Wydawnictwo Politechniki Śląskiej).

[6] Popczyk J. *Model interaktywnego rynku energii elektrycznej. Od modelu WEK-NI-EP do modelu EP-NI-WEK.* Biblioteka BŹEP – datowanie: wersja oryginalna luty 2015. http://klaster3x20.pl

[7] Popczyk J. *Nowa architektura rynku energii elektryczne. Główne mechanizmy równoważenia rynków: wschodzącego i dotychczasowego.* Materiały konferencyjne (str. 24-60) XXIV Konferencji naukowo-technicznej Rynek energii elektrycznej. Kazimierz Dolny 2018.