

Obszar strategiczny

Energetyka

Streszczenie scenariusza

### **Systemowa niestabilność**

\*\*\*

#### **Anatomia cyfrowej kruchości**

Polski system energetyczny wpada w pułapkę własnej modernizacji. Wkraczamy w erę, gdzie siedem zidentyfikowanych elementów tworzy spiralę systemowej podatności, wynikającą z nieudanej, powierzchownej automatyzacji. Proces ten, rozumiany jako przekształcenie tradycyjnych procesów manualnych w samoregulujące się systemy cyberfizyczne (zintegrowane sieci czujników, aktuatorów i systemów sterowania), staje się paradoksalnie źródłem zagrożenia, gdy pozbawiony jest solidnych fundamentów w postaci dojrzałej architektury IT.

Polska, balansując na cienkiej linii między koniecznością dekarbonizacji a ograniczeniami strukturalnymi, jawi się w tej analizie jako mikrokosmos globalnych wyzwań ery cyfrowej. Napięcie między politycznym imperatywem transformacji a rzeczywistymi możliwościami absorpcji innowacji osiąga punkt krytyczny. Prognoza do 2040 roku wskazuje na wejście sektora w stan „cyfrowej kruchości”. Jest to stan, w którym zwiększona złożoność technologiczna nie idzie w parze z odpornością. Zamiast predykcyjnego zarządzania i autonomicznych mechanizmów naprawczych, system staje się podatny na awarie kaskadowe z uwagi na fragmentację technologiczną, brak interoperacyjności oraz nagromadzenie długu technicznego – kosztów przyszłych napraw wynikających z suboptymalnych decyzji podejmowanych pod presją czasu.

#### **1. Architektura systemowej niestabilności: dylemat dywersyfikacji**

Fundamentem analizowanego scenariusza jest zjawisko „niestabilnej dywersyfikacji”. Polska Polityka Energetyczna do 2040 roku zakłada tytaniczny wysiłek inwestycyjny rzędu **1,5–1,7 biliona złotych**, z czego aż **600 miliardów złotych** dedykowane jest rozwojowi odnawialnych źródeł energii (OZE). Jest to skala porównywalna jedynie z historyczną elektryfikacją kraju w dwudziestolecie międzywojennym. Jednakże, jak wskazują przytaczane badania Chwiłkowskiej-Kubali i innych (2022), aż **70% polskich przedsiębiorstw energetycznych** znajduje się wciąż w fazie podstawowej lub startowej transformacji cyfrowej. Ta rażąca dysproporcja między fizycznym „betonem i stalą” a cyfrowym „mózgiem” systemu tworzy egzystencjalne ryzyko.

##### **1.1 Mechanizm destabilizacji i brak filarów zarządzania**

Strategia oparta na dywersyfikacji (wiatr, słońce, atom, gaz) wymaga zaawansowanych systemów zarządzania w czasie rzeczywistym. Analiza wskazuje na brak lub niedojrzałość trzech krytycznych filarów technologicznych:

- **Analityka predykcyjna.** Jest to kompetencja niezbędna do prognozowania generacji ze źródeł pogodowo-zależnych z wyprzedzeniem 24–72 godzin. Jej brak zmusza operatorów do utrzymywania kosztownych rezerw mocy wirującej. Szacuje się, że generuje to koszty operacyjne wyższe o **15–20%** w porównaniu do systemów w pełni zautomatyzowanych, co niweczy ekonomiczny sens taniej energii z OZE.
- **Automatyczna regulacja częstotliwości.** Utrzymanie stabilności sieci (50 Hz  $\pm$ 0,2 Hz) wymaga reakcji rzędu milisekund. W scenariuszu fragmentacji informatycznej, gdzie systemy nie są zintegrowane, operator traci zdolność do skoordynowanej odpowiedzi na zaburzenia, co zwiększa prawdopodobieństwo regionalnych przerw w zasilaniu (blackoutów) o szacowane **35–45%**.
- **Zarządzanie prosumenckie.** Prognozy Polskich Sieci Elektroenergetycznych mówią o **3–5 milionach** instalacji prosumenckich do 2040 roku. Bez zintegrowanej platformy cyfrowej, te miliony aktywnych punktów stają się źródłem chaosu, a nie elastyczności. Doświadczenia niemieckie z lat 2015–2020 potwierdzają, że brak inteligentnych sieci przy gwałtownym wzroście fotowoltaiki prowadzi do destabilizacji napięciowej.

### 1.2 Złożoność dekompozycyjna i prognozy ilościowe

System wkracza w fazę „złożoności dekompozycyjnej” – staje się zbyt skomplikowany dla dostępnych narzędzi kontrolnych. Jak dowodzą badania Inderwildi i innych (2020) opublikowane w *Energy & Environmental Science*, pełna automatyzacja mogłaby obniżyć koszty integracji OZE z 7% do 1,6% wydatków systemowych. Jednakże, przy obecnym, powolnym tempie cyfryzacji w Polsce (przyrost dojrzałości o zaledwie **0,3–0,5 punktu** rocznie), koszty operacyjne mogą wzrosnąć dramatycznie. Analiza Polskiego Instytutu Ekonomicznego sugeruje, że każdy rok opóźnienia w integracji cyfrowej zwiększa skumulowane koszty transformacji o 3–5%, co w perspektywie 2040 roku może oznaczać dodatkowe obciążenie rzędu **150–250 miliardów złotych**.

## 2. Deregulacja jako katalizator entropii systemowej

Drugim kluczowym wektorem jest proces deregulacji, który paradoksalnie nie uwalnia innowacyjności, lecz potęguje chaos. W obliczu presji społecznej i geopolitycznej (wysokie ceny energii, echa konfliktu na wschodzie), następuje erozja konsensusu klimatycznego. Raporty Corporate Europe Observatory (2025) wskazują na silny lobbing na rzecz rewizji polityki dekarbonizacji. W Polsce materializuje się wariant „rezygnacji z regulacji klimatycznych”.

### 2.1 Trzy obszary deregulacji i ich skutki

Proces wycofywania państwa z aktywnej polityki energetycznej obejmuje trzy sfery:

1. **Redukcja obligatoryjnych udziałów OZE.** Zniesienie kar za niedotrzymanie celów odnawialnych usuwa presję modernizacyjną. Inwestorzy, kierując się krótkoterminową racjonalnością, przedłużają życie aktywów węglowych. Przykład australijskiego Queensland pokazuje, że takie rozluźnienie standardów może skutkować spadkiem nowych inwestycji w OZE o blisko połowę (47%) w ciągu dwóch lat.
2. **Zawieszenie podatków emisyjnych.** Eliminacja sygnału cenowego (szacowanego na 80–100 euro za tonę CO<sub>2</sub>) sprawia, że technologie wysokoemisyjne odzyskują rentowność. Prowadzi to do „uwięzienia” w przestarzałych technologiach i zablokowania kapitału w infrastrukturze, która w długim terminie stanie się obciążeniem.

3. **Likwidacja dopłat do cyfryzacji.** Usunięcie wsparcia publicznego dla cyfrowej transformacji energetyki skazuje sektor na niedoinwestowanie. Jak wskazują badania Jamasb i Pollitt (2008), bez interwencji państwa poziom inwestycji prywatnych w infrastrukturę sieciową osiąga zaledwie **40–60%** poziomu społecznie optymalnego.

## 2.2 Dysfunkcje technologiczne w środowisku zderegulowanym

Brak centralnej koordynacji i standardów prowadzi do trzech patologii technologicznych:

- **Brak interoperacyjności („Wieża Babel”).** Powstają cyfrowe silosy. Operatorzy rozwijają systemy niezdolne do wymiany danych. Operator Systemu Przesyłowego traci „wzrok” na poziomie dystrybucji, co w sytuacji kryzysowej uniemożliwia precyzyjne sterowanie.
- **Nedoinwestowanie w cyberbezpieczeństwo.** W logice cięcia kosztów, bezpieczeństwo cyfrowe traktowane jest jako zbędny wydatek. Raport ENISA (2024) dokumentuje dramatyczny wzrost liczby cyberataków na infrastrukturę energetyczną o **340%** w latach 2019–2024. Aż 68% z nich wykorzystywało luki w przestarzałych systemach.
- **Wyścig na dno (Race to the bottom).** Konkurencja cenowa wymusza stosowanie najtańszych, często wątpliwych jakościowo rozwiązań technicznych (np. tanie systemy SCADA wschodniej proweniencji), które nie zapewniają długoterminowego wsparcia ani bezpieczeństwa. Badania Safarzyńskiej i van den Bergħa (2017) sugerują, że gwałtowna prywatyzacja bez silnych ram regulacyjnych zwiększa ryzyko awarii kaskadowych o **35–40%** w horyzoncie 15 lat.

## 3. Pustynia Wdrożeń Informatycznych: Stan Faktyczny

Analiza wprowadza pojęcie „pustyni wdrożeń informatycznych” – stanu, w którym mimo dostępności technologii, sektor jest niezdolny do ich efektywnej absorpcji. Jest to krajobraz pełen „technologicznych palimpsestów”, gdzie nowoczesne wyspy cyfrowe toną w morzu przestarzałej infrastruktury.

Empiryczne wskaźniki dla Polski (lata 2024–2025) są alarmujące. Z badań Chwiłkowskiej-Kubali wynika, że zaledwie **8% przedsiębiorstw energetycznych** osiągnęło fazę dojrzałości cyfrowej (głównie największe spółki Skarbu Państwa). Pozostałe 92% to organizacje działające w trybie reaktywnym, z chaotycznymi wdrożeniami. Wskaźnik adopcji rozwiązań chmurowych (Cloud Computing) wynosi jedynie **4,96 na 7 punktów**, przy czym dotyczy on głównie systemów biurowych, a nie krytycznych technologii operacyjnych (OT).

Szczególnie niebezpieczne jest zjawisko „czyścica pilotaży” – mnożenie projektów testowych, które nigdy nie są skalowane do poziomu całego przedsiębiorstwa z powodu barier integracyjnych. Dodatkowo, struktura wydatków IT w Polsce odbiega od standardów światowych. Podczas gdy globalnie 60–70% budżetów przeznaczają się na konserwację i rozwój systemów, w Polsce jest to jedynie **35–45%**. Prowadzi to do szybkiej deprecjacji zainstalowanych rozwiązań i narastania długu technicznego.

## 4. Fragmentacja kompetencyjna i erozja kapitału ludzkiego

Należy założyć pogłębiającą się lukę kompetencyjną. Z jednej strony następuje odpływ specjalistów IT z sektora energetycznego do bardziej atrakcyjnych finansowo branż (fintech, e-commerce), z drugiej – system edukacji nie nadąża z kształceniem inżynierów o profilu hybrydowym (energetyka + IT/Data Science). Brak kadr zdolnych do obsługi złożonych systemów cyberfizycznych sprawia, że nawet zakupione nowoczesne technologie nie są w pełni wykorzystywane. Operatorzy w sterowniach, przytłoczeni nadmiarem danych, których nie potrafią zinterpretować (data overload), wracają do procedur manualnych lub intuicyjnych, co w warunkach wysokiej zmienności OZE jest receptą na błąd ludzki.

## 5. Awaryjność jako „Nowa Norma”: Konsekwencje operacyjne

Awarie przestają być zdarzeniami wyjątkowymi, a stają się elementem codzienności operacyjnej. Systemowa niestabilność objawia się nie tyle w spektakularnych blackoutach krajowych (choć ich ryzyko rośnie), co w powszechnych „brownoutach” – lokalnych spadkach jakości energii, chwilowych przerwach w dostawach i niestabilności napięciowej.

Dla przemysłu energochłonnego oznacza to konieczność inwestowania w kosztowne systemy podtrzymania zasilania i własne źródła wytwórcze, co prowadzi do dalszej fragmentacji systemu (ucieczka dużych odbiorców z sieci publicznej). To zjawisko „defekcji z sieci” (grid deflection) podkopuje bazę przychodową operatorów dystrybucyjnych, ograniczając ich środki na niezbędne modernizacje – pętla sprzężenia zwrotnego się domyka.

## 6. Finansowy wymiar niestabilności

Skutki finansowe scenariusza „systemowej niestabilności” są dewastujące. Zmienność kosztów bilansowania systemu, prognozowana przez modelowanie Monte Carlo zespołu Inderwildi, ma być wyższa o **40–60%** w porównaniu do systemu stabilnego cyfrowo. Oznacza to bezpośrednie przełożenie na rachunki odbiorców końcowych oraz utratę konkurencyjności polskiej gospodarki.

Ponadto, brak przejrzystości i przewidywalności systemu energetycznego podnosi koszt kapitału dla inwestycji w Polsce. Ryzyko regulacyjne i operacyjne zostaje wycenione przez rynki finansowe, co podnosi oprocentowanie kredytów i obligacji korporacyjnych spółek energetycznych. W skrajnym przypadku może dojść do spirali płynnościowej, gdzie po serii awarii technicznych następuje gwałtowna obniżka ratingów kredytowych kluczowych operatorów.

## 7. Konkluzje i implikacje strategiczne

**Bez radykalnej zmiany paradygmatu zarządzania cyfryzacją, polska transformacja energetyczna jest skazana na porażkę. Technologia nie jest magicznym rozwiązaniem problemów strukturalnych, a niewłaściwie wdrożona staje się ich akceleratorem.**

Główne wnioski strategiczne płynące z analizy to:

- **Imperatyw integracji.** Cyfryzacja nie może być procesem wyspowym. Konieczne jest narzucenie (nawet drogą regulacyjną) wspólnych standardów interoperacyjności dla całego sektora, od farm wiatrowych na Bałtyku po liczniki w gospodarstwach domowych.
- **Cyberbezpieczeństwo jako fundament.** Ochrona infrastruktury cyfrowej musi być traktowana na równi z bezpieczeństwem fizycznym elektrowni. Wymaga to odejścia od rachunku ekonomicznego opartego wyłącznie na krótkoterminowym zysku.
- **Realizm inwestycyjny.** Plany rozbudowy OZE muszą być skorelowane z tempem rozwoju sieci inteligentnych. Dalsze pompowanie mocy wytwórczych w „głupią” sieć (smart grid-less network) jest drogą donikąd.

Scenariusz stanowi ostrzeżenie przed iluzją postępu. Pokazuje, że nowoczesność nie mierzy się liczbą zainstalowanych paneli fotowoltaicznych, ale inteligencją systemu, który nimi zarządza. Polska energetyka stoi przed wyborem: albo dokona skoku jakościowego w sferze zarządzania danymi i architekturą systemową, albo utonie w chaosie własnej złożoności, płacąc za to cenę w postaci niskiej niezawodności i astronomicznych kosztów.



Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego



**Polskie Towarzystwo Cyfrowe**  
<http://cyfryzacja.org>

Projekt finansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez  
Ministra Edukacji i Nauki w ramach Programu „Nauka dla Społeczeństwa II”.  
Dofinansowanie: 1 467 000 zł, Całkowita wartość: 1 467 000 zł