

ZADANIE

Zintegrowany model serwisowy dla wieloturbinowej elektrowni wiatrowej¹

Wstęp

Rozwój energetyki wiatrowej — szczególnie budowa rozległych farm złożonych z kilkudziesięciu lub setek turbin — wymaga nie tylko dobrze przygotowanego projektu budowlanego, lecz także złożonych analiz, w tym opracowania planu eksploatacji i utrzymania obiektu. To właśnie na etapie **planowania operacyjnego** (zwanego często fazą *Operations & Maintenance* w cyklu życia projektu) zapadają decyzje, które w największym stopniu determinują długofalową rentowność inwestycji. Modele symulacyjne pozwalają jeszcze przed wbiciem pierwszej łopaty określić:

- **Wymagane zasoby serwisowe** (liczbę załóg, pojazdów i części zamiennych).
- **Główne wąskie gardła logistyczne** – np. dostępność sprzętu przy awariach.
- **Koszt całkowity utrzymania** w różnych scenariuszach pogodowych i przy różnych strategiach serwisowych.
- **Ryzyko przestoju** i wynikające z niego straty produkcyjne i finansowe.

Kontekst modelu

W proponowanym zadaniu analizujemy **farmę wiatrową obsługiwaną przez jedno centrum serwisowe**, które dysponuje flotą **2 helikopterów i 5 ciężarówek**. Serwis dzieli się na dwa podstawowe typy aktywności:

Rodzaj obsługi:	Częstotliwość / MTBF ²	Sprzęt	Czas obsługi
Konserwacja okresowa	Co 2 tygodnie	Ciężarówka	10 h
Naprawa awaryjna	Średnio co 50 dni	Helikopter	10–20 h (rozkład jednostajny)

¹ Niniejsze zadanie w polskiej wersji językowej zostało przygotowane na podstawie bazy przykładów © The AnyLogic Company. [HomeTutorials Wind Turbine Maintenance \(Agents\)](#)
Plik wyłącznie do użytku edukacyjnego!

² Mean time between failures - **średni oczekiwany czas pracy urządzenia od zakończenia jednej awarii (lub od momentu, w którym zostało naprawione) do wystąpienia kolejnej awarii wymuszającej naprawę**. W praktyce oznacza to przeciętną długość „bezawaryjnego” okresu eksploatacji. Uwaga: MTBF jest wartością statystyczną, pojedyncze urządzenie może pracować znacznie krócej lub dłużej.

Model można rozszerzyć o **koszty aktywności** (np. stawki załóg, koszty wynajmu helikoptera), **wymianę części** o różnej wartości czy uwzględnienie *downtime cost*³ wynikającego z utraconej produkcji energii.

Znaczenie w cyklu życia projektu

1. **Faza koncepcyjna / studium wykonalności** – wstępne symulacje odsłaniają wpływ logistyki utrzymania na LCOE (Levelized Cost of Energy).
2. **Faza projektowa** – wyniki modelu pomagają dobrać lokalizację centrum serwisowego, wymaganą liczbę załóg i pojazdów oraz zapasy części.
3. **Faza budowy** – harmonogram budowy może zostać skoordynowany z planowanym terminem pierwszych przeglądów okresowych.
4. **Faza eksploatacji** – model służy jako cyfrowy bliźniak (*digital twin*), pozwalając stale optymalizować harmonogramy i koszty utrzymania.

W efekcie taki model staje się narzędziem decyzyjnym, które **minimalizuje przestoje, obniża koszty O&M** i zwiększa niezawodność dostaw energii przez cały okres życia farmy wiatrowej.

Choć przykładowy model dotyczy farmy wiatrowej, **ta sama logika – łączenie zdarzeń operacyjnych, zasobów serwisowych i kosztów przestojów – jest uniwersalna** dla całej branży budowlanej i infrastrukturalnej. Kluczowy jest fakt, że niemal każdy obiekt inżynierski przechodzi ten sam cykl życia: planowanie → budowa → eksploatacja → utrzymanie → modernizacja lub rozbiórka. W fazach eksploatacji i utrzymania często generowane są najwyższe koszty i największe ryzyko, dlatego warto je policzyć *przed* rozpoczęciem inwestycji.

Efekty biznesowe

- **Lepszy CAPEX vs OPEX trade-off**⁴ – łatwiej pokazać, kiedy inwestycja w dodatkowy sprzęt serwisowy spłaca się krótszym przestojem.
- **Dokładniejsze harmonogramy budowy** – wiedząc, jak wcześniej trzeba stworzyć zaplecze utrzymania, można uniknąć kosztownych „luk” między końcem montażu a startem eksploatacji.
- **Transparentna komunikacja z inwestorem** – symulacja w jasny sposób pokazuje wpływ awarii i serwisu na wskaźniki finansowe, np. NPV.
- **Podstawa do cyfrowego bliźniaka** – model stworzony w fazie planowania może zostać podłączony do danych rzeczywistych i służyć przez dekady do ciągłej optymalizacji.

³ **Downtime cost** (koszt przestoju) – to całkowita wartość strat ponoszonych, gdy urządzenie, linia produkcyjna lub cały zakład nie mogą wykonywać zaplanowanej pracy z powodu awarii, konserwacji lub innego zakłócenia.

⁴ **CAPEX** - Capital Expenditures (nakłady inwestycyjne), **OPEX** - Operating Expenditures (koszty operacyjne).

Przykłady przeniesienia koncepcji

Typ projektu	Obiekty/ zasoby	Typowe zdarzenia serwisowe	Wymagane zasoby logistyczne	Korzyści z modelu
Linia kolejowa	Lokomotywy, wagony, zwrotnice	Przeglądy okresowe, awarie trakcji	Pojazdy torowe, ekipy toromistrzów	Optymalny harmonogram prac nocnych, minimalizacja opóźnień pociągów
Sieć drogowa / mosty	Odcinki jezdni, przęsła mostów	Inspekcje, naprawy nawierzchni	Ekipy drogowe, mobilne bariery, objazdy	Szacowanie wpływu robót na ruch i koszty społeczne korków
Budynki wysokościowe	Windy, HVAC, agregaty prądotwórcze	Serwisy kwartalne, interwencje 24/7	Brygady techniczne, zapas części	Prognoza dostępności urządzeń krytycznych i kosztów energii
Elektrownia PV	Panele, falowniki, stacje transformatorowe	Mycie paneli, wymiana inwerterów	Drony inspekcyjne, wozy serwisowe	Ocena utraty mocy przy różnych strategiach czyszczenia
Zakład produkcyjny	Linie montażowe, roboty, prasy	Planowane remonty, awarie maszyn	Zespoły utrzymania ruchu, dźwigi	Bilansowanie planu produkcji z terminami napraw

Przykłady CAPEX vs OPEX trade-off (farma wiatrowa)

Decyzja	Wpływ na CAPEX	Wpływ na OPEX	Efekt trade-off
Zakup 3. helikoptera zamiast wynajmu ad-hoc	+10 mln zł	–2 mln zł rocznie (mniej kar za przestoje, brak drogich wynajmów)	Po 5 latach inwestycja się zwraca; potem generuje oszczędności
Instalacja czujników predykcyjnych na turbinach	+0,5 mln zł	–0,4 mln zł rocznie (mniej awarii, krótszy downtime)	Break-even w 15 miesięcy
Użycie tańszych, „budżetowych” łożysk	–0,8 mln zł	+0,3 mln zł rocznie (częstsze wymiany)	Po 3 latach łączny koszt wyższy niż wariant premium