

Prognozowanie degradacji oparte na czujnikach i prognozowanie dla oszacowania pozostałego okresu użytkowania: walidacja na danych eksperymentalnych silników elektrycznych

By kama3 kama3
cze 11, 2025

Prognostyka to rozwijająca się nauka przewidywania stanu zdrowia systemu i/lub jego komponentów, w oparciu o bieżący i poprzedni stan systemu, z ostatecznym celem dokładnego przewidywania pozostałego okresu użytkowania (RUL). Na podstawie tego założenia komponenty/systemy mogą być monitorowane w celu śledzenia stanu zdrowia podczas działania. Uzyskane dane są zazwyczaj przetwarzane w celu wyodrębnienia istotnych cech związanych ze stanem degradacji komponentu/systemu. Często korzystne jest połączenie kilku z tych parametrów degradacji poprzez proces optymalizacji w celu opracowania pojedynczego parametru, zwanego parametrem prognostycznym, który można wyznaczyć w celu oszacowania RUL.

Wyniki pokazują, że metoda OLS, średnio, generowała najlepszą wydajność parametrów prognostycznych przy użyciu kombinacji cech domeny czasu. Jednak najlepszą wydajność pojedynczego modelu uzyskano przy użyciu metodologii GA. W tym przypadku szacowany RUL prawie pokrywał się z rzeczywistym RUL, a bezwzględny błąd procentowy wynosił średnio poniżej 5% pod koniec okresu eksploatacji.

1. WSTĘP

Rosnąca potrzeba zwiększenia konkurencyjności systemów przemysłowych wymaga redukcji kosztów konserwacji bez narażania bezpiecznej eksploatacji zakładu. Dlatego prognozowanie przyszłego zachowania systemu lub komponentu pozwala na bardziej optymalne planowanie konserwacji i oszczędności kosztów, ponieważ można uniknąć nieoczekiwanych napraw i przestojów.

Bardziej ogólnie, przewidywanie przyszłych awarii może dostarczyć kluczowych informacji do procesu podejmowania decyzji. Ponieważ koszty przerwania działalności zwykle okazują się znacznie wyższe niż koszty wykonania napraw wymaganych do powrotu do eksploatacji, maksymalizacja dostępności maszyn jest niezbędna do promowania rentownej eksploatacji.

Konserwacja oparta na stanie online (CBM) to nowa filozofia konserwacji obejmująca analizę danych czujników sprzętu w czasie rzeczywistym w celu wnioskowania o stanie konserwacji lub kondycji. Czynności konserwacyjne są następnie wykonywane na podstawie konieczności, zidentyfikowanej przez system konserwacji oparty na stanie.

W porównaniu z tradycyjnymi filozofiami konserwacji, CBM oferuje potencjał minimalizacji przypadków awarii sprzętu, redukcji planowanych czynności konserwacyjnych, maksymalizacji żywotności podzespołów o ograniczonej żywotności i zwiększenia dostępności sprzętu. Jednakże, kluczowe dla powodzenia wdrożenia filozofii konserwacji opartej na stanie są niezbędne techniczne możliwości wnioskowania o stanie sprzętu na podstawie pomiarów procesu w czasie rzeczywistym, tak aby można było podejmować świadome decyzje dotyczące konserwacji. Rozwój technicznych możliwości wdrożenia filozofii konserwacji opartej na stanie, w tym rozwój predykcyjnych modeli prognostycznych, jest przedmiotem dużego zainteresowania w niemal wszystkich środowiskach przemysłowych, w których dostępność, niezawodność i wydajność maszyn są w ramach jego konkretnego zastosowania.

Można się spodziewać, że komponent ulegnie awarii, gdy ścieżka degradacji osiągnie próg awarii. W prognozach typu III parametr degradacji, który jest miarą charakteryzującą postęp do awarii, może być albo pomiarami wyczuwalnymi, albo zmiennymi wnioskowanymi. W prognozach typu III dane dotyczące tego, jak system reaguje na środowisko operacyjne i jak ulega degradacji, nazywane są parametrami degradacji i często są łączone w parametr prognostyczny: parametr, który można wykorzystać jako miarę uszkodzenia. Ten parametr prognostyczny jest następnie wykorzystywany do konstruowania modelu prognostycznego. W tej dziedzinie badań niedawno opublikowano kilka artykułów, których celem jest zapewnienie kompleksowego przeglądu dostępnych technik prognostycznych i powiązanych obszarów zastosowań. Bryg i in. (2008) stosują regresję logistyczną do danych startowych silników samolotów i informacji o usterkach układu sterowania, aby określić prawdopodobieństwo awarii w czasie. Heng i in. (2009a) zidentyfikowali zalety i wady różnych technik prognostycznych, a także omówili zidentyfikowane wyzwania, takie jak wymóg wykorzystania niekompletnych danych trendowych, uwzględnienia skutków zmiennych warunków pracy i uwzględnienia interakcji awarii. Heng i in. (2009b) opracowali model prognostyczny, który składa się z sieci neuronowej, używanej jako estymator funkcji gęstości prawdopodobieństwa i stosowanej do danych dotyczących drgań pompy.

Li i Nilkitsaranont (2009) opracowali zarówno technikę regresji liniowej, jak i kwadratowej w celu przewidywania pozostałego okresu użytkowania silników turbin gazowych. Si i in. (2011) dokonali przeglądu najnowszych osiągnięć w zakresie modelowania w celu oszacowania pozostałego okresu użytkowania za pomocą podejść opartych na danych statystycznych.

Watson i in. (2011) przeprowadzili analizę opartą na modelu siłowników elektromechanicznych: model okresu użytkowania siłownika i probabilistyczne podejście prognostyczne są wykorzystywane do określenia pozostałego okresu użytkowania systemu.

Pierwszy etap w dowolnym systemie monitorowania stanu zazwyczaj obejmuje odpowiednie wstępne przetwarzanie danych czujników sprzętu. Ten etap jest często określany jako ekstrakcja cech. Ekstrakcja cech to proces ekstrakcji użytecznych informacji z surowych danych sygnałowych. Etap ekstrakcji cech w systemie monitorowania stanu zdrowia jest zaprojektowany w celu wygenerowania wektora cech danych, który może być użyty do wnioskowania o bieżącym stanie awarii monitorowanego systemu. Jednak w miarę degradacji sprzętu mierzone parametry systemu mają tendencję do zmiany; dlatego pomiary wykrywane lub odpowiednie ich transformacje mogą być użyte do scharakteryzowania degradacji systemu.

Tradycyjnie metody prognostyczne typu III wykorzystują pewną miarę degradacji do oszacowania RUL. Korzystne jest połączenie kilku miar degradacji w jeden parametr, zidentyfikowany jako parametr prognostyczny, aby zapewnić bardziej solidny model prognostyczny. Wybór odpowiedniego parametru prognostycznego jest kluczowy dla tworzenia użytecznych indywidualnych szacunków RUL.

W tym artykule opisano procedurę prognostyczną szacowania pozostałego okresu użytkowania (RUL), składającą się z dwóch oddzielnych kroków. Najpierw wyodrębnione cechy są łączone w celu wytworzenia parametru prognostycznego, który ma być skorelowany z RUL. Następnie ten parametr jest modelowany za pomocą ogólnego modelu ścieżki (GPM) i ekstrapolowany do progu awarii w celu oszacowania RUL.

Następnie metody **szacowania algorytmu genetycznego (GA)** i zwykłych najmniejszych kwadratów (OLS) są używane do opracowania odpowiednich parametrów prognostycznych z wybranych cech. Na koniec zaawansowane metryki prognostyczne są używane do dokładnej oceny wydajności modelu i walidacji metodologii w odniesieniu do danych eksperymentalnych pobranych dla grupy silników trójfazowych o podobnych ścieżkach degradacji, głównie z powodu awarii łożysk. Niniejszy artykuł jest zorganizowany w następujący sposób: Sekcja 2 przedstawia podstawowe koncepcje dotyczące systemów konserwacji i monitorowania stanu opartych na stanie; Rozdział 3 opisuje procedurę prognostyczną wykorzystywaną w tym

dokumentację do szacowania pozostałego okresu użytkowania; Rozdział 4 przedstawia metryki wykorzystywane do oceny niezawodności metodologii prognostycznej; Rozdział 5 przedstawia dane eksperymentalne wykorzystywane do walidacji metodologii prognostycznej; Rozdział 6 przedstawia wyniki i omawia możliwości metodologii prognostycznej; a Rozdział 7 podsumowuje najważniejsze wnioski.

2. MONITOROWANIE STANU W KONSERWACJI OPARTE NA STANIE

Tradycyjnie działania konserwacyjne podejmowały jedno z dwóch podejść: zapobiegawcze i naprawcze. Pomędzy tymi dwoma skrajnościami znajduje się konserwacja oparta na stanie, w której działania konserwacyjne są wykonywane w razie potrzeby na podstawie stanu sprzętu. Ważne jest, aby dokładnie określić trend wpływu usterki na wydajność systemu za pomocą poprawnego i odpowiedniego typowego systemu monitorowania stanu.

(Hines i in., 2006a; Loboda i Feldshtein, 2010; Palmè i in., 2009). Rutyna korekcji błędów oznacza, że model daje najlepszą ocenę prawdziwej wartości zmiennych systemowych w warunkach bezawaryjnych, a te szacunki są porównywane z danymi zebranymi z systemu w celu wygenerowania szeregu czasowego reszt. Reszty charakteryzują odchylenia systemu od normalnego zachowania i mogą być używane do określenia, czy system działa w stanie nieprawidłowym. Na koniec, model prognostyczny jest stosowany w celu oszacowania pozostałego okresu użytkowania (RUL) systemu. Tak jak zrobiono w tym badaniu, możliwe jest wykorzystanie danych z przyspieszonego testowania degradacji, zebranych w warunkach zwiększonego naprężenia, do opracowania modelu prognostycznego. Należy jednak zachować ostrożność, aby zapewnić, że awarie widoczne podczas przyspieszonego testowania są analogiczne do awarii w świecie rzeczywistym. Warunki przyspieszonego testowania mogą skutkować trybami błędów, które występują tylko w warunkach przyspieszonego testowania. Dostępnych jest kilka metod ekstrakcji przydatnych danych, które opisują rzeczywistą pracę z danych z przyspieszonego testowania

[Read more](#)