

Grzegorz KACZOR, Augustyn LORENC

Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków

APLIKACJA NIEZAWODNOŚCIOWYCH STRUKTUR FAZOWYCH DO WYZNACZANIA NIEZAWODNOŚCI I KOSZTÓW EKSPLOATACJI TECHNICZNEJ WTRYSKIWACZY SYSTEMU COMMON RAIL

Słowa kluczowe

Wtryskiwacze, analiza niezawodności, niezawodnościowe struktury fazowe, koszty eksploatacji technicznej, generatory liczb losowych.

Streszczenie

Istotnym aspektem analizy niezawodności obiektów technicznych jest uwzględnienie poszczególnych faz w ich pracy, podczas których funkcyjne charakterystyki niezawodnościowe ulegają nieustannym zmianom. Dzięki dostępności generatorów liczb losowych, jako funkcjonalnych narzędzi ułatwiających prowadzenie dyskretnej symulacji czasu poprawnej pracy, wzrosło zaawansowanie w opracowywaniu stochastycznych metod służących do opisu zjawisk rzeczywistych. Niniejszy artykuł dotyczy wykorzystania niezawodnościowych struktur fazowych do modelowania i analizy niezawodności wtryskiwaczy układu Common Rail z uwzględnieniem kosztów ich eksploatacji technicznej.

Wprowadzenie

Wymagania stawiane współczesnym obiektom technicznym w zakresie spełniania przez nie funkcji użytkowych ciągle wzrastają. Zwiększa się zatem stopień złożoności ich struktury niezawodnościowej, co wzmaga zaangażowanie

i poszukiwanie nowatorskich rozwiązań w zakresie prowadzenia analiz niezawodności. Opracowywane są coraz dokładniejsze modele matematyczne pozwalające określić ilość wykonanej przez obiekt pracy, po której spodziewane jest jego przejście do stanu niezdatności. Jak wiadomo, jednoznaczne określenie tej wartości w praktyce inżynierskiej jest niezwykle trudne do wykonania z uwagi na szerokie spektrum zjawisk fizycznych towarzyszących pracy obiektów. Dlatego też dynamicznie rozwijającą się dziedziną matematyki jest teoria prawdopodobieństwa. Ujmuje ona metody, które z dużym powodzeniem pozwalają wydobyć jak najwięcej użytecznych informacji z danych liczbowych będących najczęściej wynikami badań empirycznych.

Aby móc symulować rzeczywiste i niełatwe do przewidzenia zjawiska towarzyszące pracy złożonych obiektów technicznych za pomocą aplikacji komputerowych, wykorzystuje się tzw. generatory liczb losowych. Są to narzędzia wytwarzające ciągi liczbowe w oparciu o pomiar wybranych parametrów danego procesu fizycznego. Rozsądne wydaje się założenie, że mierzone parametry powinny dotyczyć obiektu pracującego w warunkach rzeczywistych.

W celu zwiększenia dokładności modelu matematycznego odwzorowującego obiekt rzeczywisty należy uwzględnić zmieniające się etapy jego eksploatacji technicznej oraz zależności towarzyszące tym zmianom.

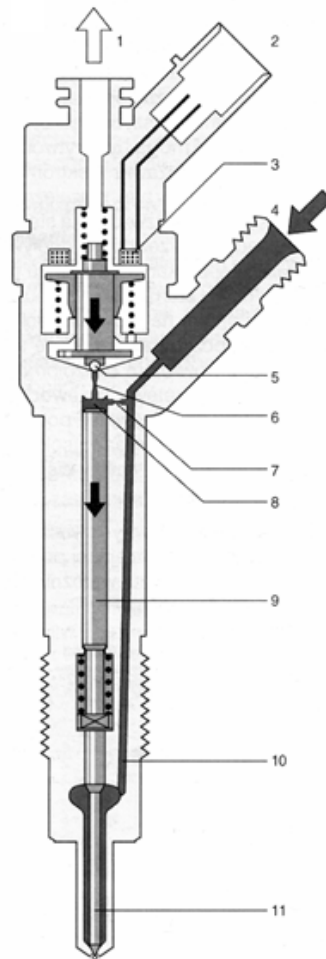
Prezentowany artykuł dotyczy zastosowania niezawodnościowych struktur fazowych do analizy niezawodności i kosztów utrzymania wtryskiwaczy układu wtryskowego typu Common Rail z wykorzystaniem metod analizy danych statystycznych i symulacji komputerowych dostępnych w aplikacjach BlockSim oraz Weibull++.

1. Obiekt analizy

Wtryskiwacze z zaworami elektromagnetycznymi nie należą obecnie do najnowszych rozwiązań elementów układu zasilania paliwem szybkoobrotowych silników wysokoprężnych. Jako że istnieją one już od ponad dziesięciu lat na rynku motoryzacyjnym, dostępne są znaczne zasoby danych empirycznych odnoszących się do ich stanów w eksploatacji technicznej. Właściwa analiza tych danych jest kluczowa do wnioskowania o ich niezawodności.

Konstrukcja przykładowego modelu wtryskiwacza z zaworem elektromagnetycznym została przedstawiona na rys. 1. Wtrysk paliwa jest realizowany przez ruch tłoczka w kierunku iglicy wywołany oddziaływaniem krzywki wałka rozrządu. Wówczas paliwo zgromadzone w komorze sterującej przemieszcza się kanalikiem wtryskowym do otworków wylotowych. W momencie ustalenia początku wtrysku przez jednostkę sterującą i zasilenia cewki zaworu elektromagnesu ciśnienie paliwa wywierane na iglicę rozpylacza zaczyna wzrastać. Jeżeli wartość tego ciśnienia będzie na tyle duża, że spowoduje pokonanie siły pochodzącej od sprężyny wtryskiwacza, to nastąpi tzw. wtrysk wstępny. Zadaniem

procesu wtrysku wstępnego jest zwiększenie temperatury powierzchni cylindra i ścianki tłoka przygotowując komorę spalania na podanie dawki zasadniczej. Objętość dawki zasadniczej jest zależna od chwilowych parametrów pracy silnika (m.in. wartość obciążenia, położenie pedału gazu, wartość prędkości obrotowej, temperatura cieczy chłodzącej). Po aplikacji dawki zasadniczej wtryskiwacze podają jeszcze tzw. dawkę dopalającą, która ogranicza spadek ciśnienia w komorze spalania. Ilość i objętość poszczególnych dawek jest zależna od indywidualnego rozwiązania konstrukcyjnego.



Rys. 1. Wtryskiwacz z zaworem elektromagnetycznym: 1 – złącze przelewu paliwa, 2 – złącze elektryczne, 3 – cewka elektromagnesu, 4 – złącze dopływu paliwa, 5 – kulka kotwicy zaworu, 6 – dławik odpływu, 7 – dławik dopływu, 8 – komora sterująca, 9 – tłoczek, 10 – kanał wtryskowy, 11 – rozpylacz z iglicą

Z uwagi na mechaniczny napęd wtryskiwacza i bezwładność jego ruchomych elementów kształtowanie procesu spalania jest ograniczone. W związku z tym pojawia się problem redukcji toksycznych substancji w spalinach i spełniania związanych z tym europejskich norm. Jest to powód, dla którego wtryskiwacze z zaworami elektromagnetycznymi ustępują wtryskiwaczom z zaworami piezoelektrycznymi.

2. Niezawodnościowe struktury fazowe

Właściwe podejście do modelowania niezawodności obiektów technicznych (systemów) wymaga m.in. wyodrębnienia poszczególnych faz w ich eksploatacji, tworzących niezawodnościową strukturę fazową. Jest to związane ze zmianą realizacji różnych zadań, które w określonych przedziałach czasu mogą ulegać ciągłej zmianie. W literaturze [7] takie systemy określa się mianem systemów wielofazowych. Każda faza eksploatacji ma założony okres trwania i może charakteryzować się odrębnymi właściwościami z uwagi na np.:

- zmianę struktury niezawodnościowej systemu względem rodzaju i ilości wykonywanej pracy w danej fazie,
- zmianę wymagań dotyczących spełniania określonych funkcji przez system dla fazy, w której aktualnie on się znajduje,
- zmianę warunków otoczenia systemu,
- lokalizację w podsystemie eksploatacji technicznej (użytkowanie, obsługa).

Z powyższych stwierdzeń można wywnioskować, iż przechodzenie systemów między określonymi fazami eksploatacji niesie za sobą zmianę wartości parametrów ich modeli matematycznych a niekiedy również zmianę rodzajów tych modeli. Wymaga to wyraźnego sprecyzowania stanu technicznego systemu na końcu danej fazy w odniesieniu do stanu technicznego tego systemu na początku fazy kolejnej. Stwarza to niekiedy trudność w przypadku modelowania systemów złożonych i może stać się pośrednio przyczyną błędów analizy niezawodności.

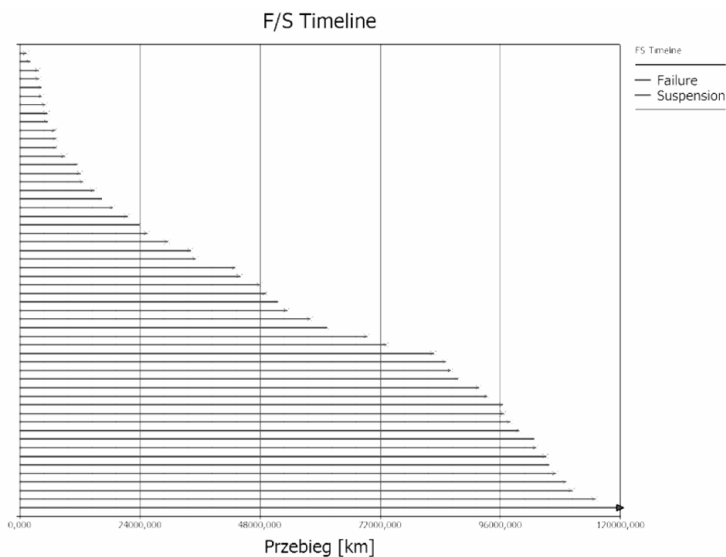
Często stosowanym modelem w przypadku analizy niezawodności systemów złożonych jest wielofazowy model Markowa. Pozwala on na modelowanie przy założeniu ciągłego czasu eksploatacji systemu i występowania dyskretnych stanów niezawodnościowych. Wynikiem analizy modelu Markowa są: przestrzeń stanów technicznych, prawdopodobieństwo ich występowania oraz intensywność przejścia między poszczególnymi fazami eksploatacji obiektu. Daje to możliwości syntezy tych stanów oraz szacowania podstawowych miar niezawodności systemu. Przykład zastosowania modelu Markowa do oceny niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania systemów został opisany szerzej w literaturze [7].

3. Metodyka analizy

3.1. Dane do analizy

Do stworzenia modelu niezawodnościowego wtryskiwacza systemu Common Rail wykorzystano dane empiryczne, zgromadzone dzięki uprzejmości jednego z autoryzowanych serwisów pojazdów samochodowych. Reprezentatywna próbka dotyczyła 90 pojazdów osobowych, w których pracowało 360 wtryskiwaczy (obiektów jednorodnych). Podstawą do stwierdzenia niezdatności wtryskiwacza było zgłoszenie danego pojazdu do serwisu spowodowane np. zauważalnym spadkiem mocy silnika lub problemem z jego uruchomieniem oraz wykonanie diagnostyki technicznej. Rejestrowano przebieg danego pojazdu odpowiadający wystąpieniu objawów niezdatnego wtryskiwacza. Badanie rozpoczęło się od chwili wprowadzenia pojazdów do eksploatacji do chwili osiągnięcia wartości przebiegu 120 000 km przez każdy z nich i było prowadzone w warunkach rzeczywistych.

Poniżej przedstawiono dane empiryczne dotyczące niezawodności wtryskiwaczy badanego układu wtryskowego w formie osi czasu.

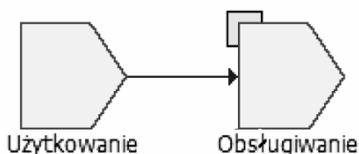


Rys. 2. Dane empiryczne wtryskiwaczy

3.2. Model analizy

Do analizy niezawodności i kosztów utrzymania wtryskiwaczy wykorzystano aplikacje BlockSim oraz Weibull++. Przyjęto strukturę dwufazową, przedstawioną na rys. 2. Jedna z faz związana jest z użytkowaniem badanych elementów a druga faza dotyczy ich obsługi. Założono, że okres realizacji fazy użytkowania wtryskiwaczy jest ciągły i wynosi 120 000 [km]. W chwili

wystąpienia stanu niezdatności tego elementu następuje zakończenie fazy użytkowania i rozpoczęcie fazy obsługi, dla której przyjęto pomijalny czas trwania procesu odnowy.



Rys. 3. Struktura fazowa wtryskiwaczy

Wykorzystując aplikację Weibull++7 oraz zgromadzone dane empiryczne, stworzono model matematyczny wtryskiwacza. Przyjęto rozkład Weibulla i dokonano estymacji jego parametrów metodą największej wiarygodności (MLE). Funkcja niezawodności rozkładu Weibulla jest dana następującą zależnością:

$$R = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

gdzie:

- β – parametr kształtu,
- η – parametr skali.

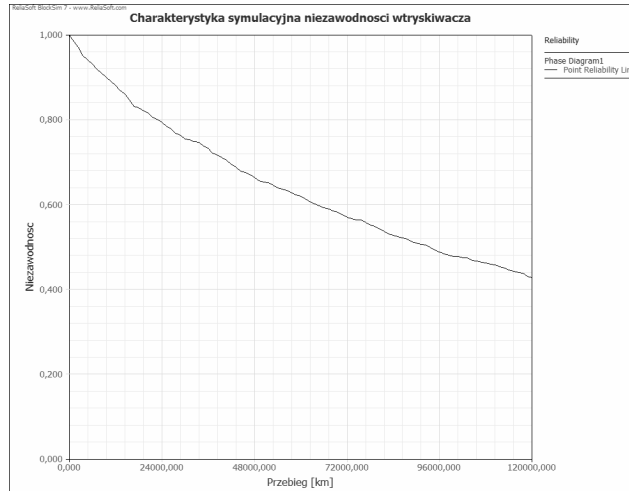
W aplikacji BlockSim 7 przeprowadzono dyskretną symulację czasu poprawnej pracy z uwzględnieniem kosztów eksploatacji technicznej wtryskiwaczy. Symulacja dotyczy okresu eksploatacji badanych pojazdów wyrażonego przebiegiem od 0 do 120 000 [km]. Do symulacji wykorzystano algorytm RNG (Regarding BlockSim's Number Generator), który opiera się na generatorze liczb losowych L'Ecuyera [3]. Pozwala on na wytwarzanie ciągów wartości wskaźników niezawodności w dowolnej chwili t , przy znanych wartościach parametrów przyjętego modelu matematycznego. Symulację wykonano dla dwóch przypadków: I i II. W przypadku I, przy wystąpieniu niezdatności dowolnego wtryskiwacza w pojeździe założono wymianę również pozostałych. W przypadku II przyjęto symulować wymianę jedynie niezdatnych wtryskiwaczy.

Tabela 1. Dane eksploatacyjne niezawodności elementów badanego systemu Common Rail

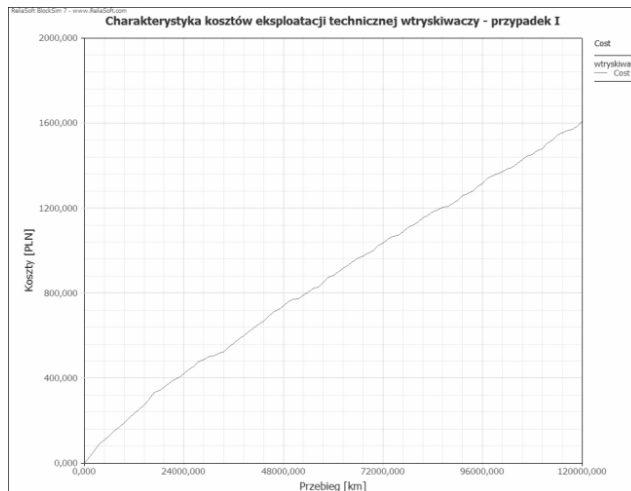
Przypadek I		Przypadek II	
Koszt zakupu 1 wtryskiwacza [zł]	Całkowity koszt wymiany 1 wtryskiwacza [zł]	Koszt zakupu 4 wtryskiwaczy [zł]	Całkowity koszt wymiany 4 wtryskiwaczy [zł]
1845	1310	7380	1886

3.3. Wyniki analizy

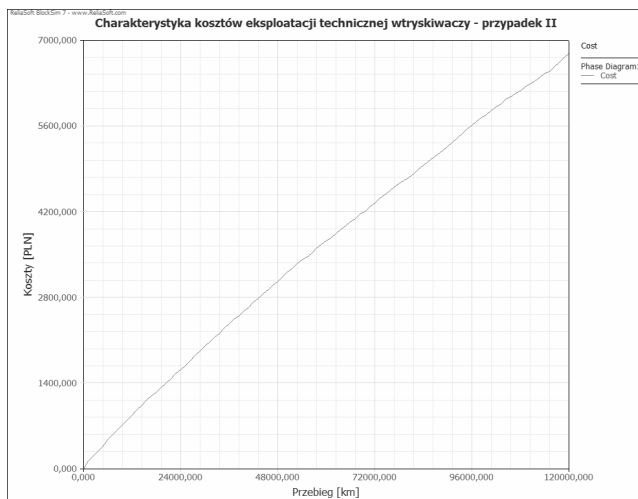
Wyniki symulacji niezawodności i kosztów eksploatacji technicznej wtryskiwaczy zostały przedstawione poniżej:



Ryc. 4. Charakterystyka symulacyjna niezawodności wtryskiwacza



Ryc. 5. Charakterystyka kosztów eksploatacji technicznej wtryskiwaczy w przypadku I



Ryc. 6. Charakterystyka kosztów eksploatacji technicznej wtryskiwaczy w przypadku II

Metodą symulacji dyskretnej wyznaczono również średnią wartość przebiegu pojazdu, po której wystąpi pierwszy przypadek niezdatności wtryskiwacza. Wynosi on 134 801 km.

5. Podsumowanie

W artykule dokonano analizy niezawodności i kosztów eksploatacji technicznej wtryskiwaczy systemu Common Rail w oparciu o dane empiryczne dostarczone przez serwis pojazdów samochodowych. Można stwierdzić, że badane wtryskiwacze z zaworami elektromagnetycznymi charakteryzują się wysoką niezawodnością w odniesieniu do trudnych warunków ich pracy. Średnia wartość przebiegu pojazdu, dla której po raz pierwszy wystąpi niezdatność wtryskiwacza, jest większa niż wartość przebiegu wynikająca z zakończenia badania przez serwis. Wzrost kosztów eksploatacji technicznej wtryskiwaczy ma charakter liniowy. Przy założeniu wymiany tylko niezdatnego wtryskiwacza szacowane koszty eksploatacji wynoszą ok. 1600 zł dla wartości przebiegu pojazdu równego 120 000 km. Wymiana wszystkich wtryskiwaczy jednocześnie przy wystąpieniu niezdatności chociażby jednego z nich dla założonego okresu eksploatacji generuje koszty ok. 6800 zł. Szczególnego znaczenia w analizach niezawodności obiektów technicznych nabierają metody komputerowego wspomaganie wykorzystujące specjalistyczne oprogramowania.

Bibliografia

1. Bondavalli A., Chiaradonna S., Di Giandomenico F., Mura I.: Dependability Modeling and Evaluation of Multiple-Phased Systems Using DEEM. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 53, No. 4, 2004.
2. Kaczor G.: Analiza niezawodności układu wtryskowego typu Common Rail. Praca dyplomowa magisterska, Kraków 2011.
3. L'Ecuyer P.: Random Number Generation. Handbook of Simulation, rozdz. 4. Wiley, New York 1998.
4. Manzini R., Regattieri A., Pham H., Ferrari E.: Maintenance for Industrial Systems. Springer, 2010.
5. Nowakowski T.: Niezawodność Systemów Logistycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
6. Wajand A., Wajand T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993, 2005.
7. Zając M., Budny T.: The development of semi-Markov transportation model. Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications, Vol. 4, Taylor&Francis. Leiden, 2008.
8. System Analysis Reference. Reliability, Availability, & Optimization. BlockSim 7. Reliasoft Corporation. Tucson AZ USA 1999–2007.

Recenzent:
Marek IDZIOR

Application of Reliability Phase Diagrams to Determine the Reliability and Operating Cost of Common Rail System Injectors

Key words

Injection systems, reliability analysis, reliability phase diagrams, operation cost, random number generators.

Summary

An important aspect of the reliability analysis of technical objects is to take into account various phases in their operation during which the functional characteristics of reliability are changed. The sophistication level of the development of the stochastic methods that are used to describe the real phenomena has increased since random number generators were introduced. This article concerns the use of reliability phase diagrams to create a reliability model including the costs of their operation.

