

Zbigniew Kasprzyk
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Telekomunikacji w Transporcie

Mirosław Siergiejczyk
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Telekomunikacji w Transporcie

METODOLOGIA SZACOWANIA OBSŁUGIWALNOŚCI I NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TELEMATYKI AUTOSTRADOWEJ W CELU OPRACOWANIA JEGO STRATEGII EKSPLOATACJI

Streszczenie: W referacie zaprezentowano koncepcję wykorzystania metody analizy narażeń części (ang. *Part Stress Analysis Prediction*) wraz z metodą szacowania obsługiwalności systemu (ang. *Maintainability Prediction*) na przykładzie pętli przejazdowej będącej jednym z zasadniczych elementów systemu poboru opłat. Do wyznaczenia wartości wskaźników niezawodnościowych oraz szacowania obsługiwalności pozostałych elementów systemu poboru opłat wykorzystano środowisko oprogramowania w postaci komercyjnych programów Lambda Predict w wersji 3.01 firmy Reliasoft oraz Item Toolkit w wersji 7.08 firmy Item Software. Efektem niniejszego opracowania jest wyznaczenie stacjonarnej gotowości pojedynczego stanowiska punktu poboru opłat. Celem prognozy niezawodności i obsługiwalności elementów systemu poboru opłat, jest analiza i ocena systemu pozwalająca na opracowanie harmonogramu pracy systemu przy określonej gotowości w przepisach normatywnych.

Słowa kluczowe: metody prognozowania niezawodności i obsługiwalności obiektów technicznych, system poboru opłat, metoda analizy narażeń części

1. WSTĘP

Analizując obecny stan systemu poboru opłat na tle innych krajów Unii Europejskiej można zauważyć, iż istnieją odległe w czasie możliwości rozwoju tego systemu wymuszające eksploatację manualnego systemu poboru opłat (MSP). Modernizacja tego systemu do standardu krajów UE będzie możliwa nie wcześniej jak po 1 stycznia 2011 roku i polegać będzie na budowie Krajowego Systemu Poboru Opłat (KSPO). Krajowy System Poboru Opłat będzie eksploatował dwa rodzaje systemów - elektroniczny system poboru opłat (ESP) i manualny system poboru opłat (MSP).

Należy zauważyć, że niezawodność KSPO jest szczególnie ważna, gdyż zapewnia on wpływy z opłat za przejazdy po drogach krajowych. Przerwanie działalności systemu spowoduje utratę wpływów z opłat za przejazdy, które to z kolei umożliwiają utrzymanie infrastruktury drogowej zapewniającą ciągłość usługi transportowej. Z tego też względu istnieje przesłanka do opracowania optymalnej strategii eksploatacji systemu dla ustalonego wyposażenia i wymaganego poziomu gotowości systemu określonego w przepisach normatywnych. Ze względu na fakt iż nie napotkano publikacji bezpośrednio dotyczących wyznaczonych parametrów niezawodnościowych manualnego systemu poboru opłat, więc aby odpowiednio opracować strategię eksploatacji systemu należy określić prognozowaną niezawodność i obsługiwalność systemu MSP. Opracowanie strategii eksploatacji wymaga stworzenia modelu niezawodnościowego systemu, którego obserwacja umożliwi adaptację istniejących strategii w celu spełnienia wymagań eksploatacyjno-niezawodnościowych tego systemu a w szczególności wymaganego poziomu gotowości, określonego w Podstawowych Wymaganiach Technicznych do Projektowania, Budowy, Eksploatacji i Zwrotu Autostrady opracowanych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad.

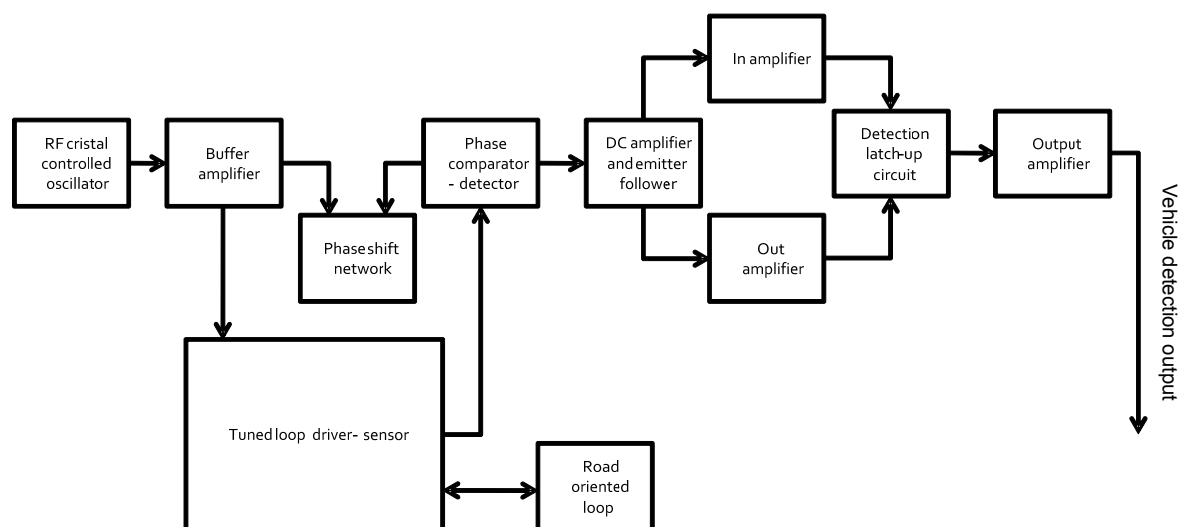
W celu określenia prognozowanej niezawodności systemu można wykorzystać jedną z wielu metod prognozowania niezawodności obiektów technicznych. Powszechnie stosowany i uznawany jest model Military Handbook 217 utworzony w celu zapewnienia standardu oceny niezawodności elementów elektronicznych i sprzętu wojskowego do zwiększenia niezawodności projektowanego sprzętu. Model ten przedstawia dwa sposoby przewidywania niezawodności obiektów technicznych: prognozowanie na podstawie liczebności części (ang. *Parts Count*) oraz prognozowanie na podstawie analizy narażeń części (ang. *Part Stress Analysis*). Metoda analizy narażeń części jest metodą bardziej dokładną i w jej przypadku wskaźnik awaryjności dla każdego elementu jest obliczany osobno na podstawie określonych poziomów obciążenia. Generuje ona zwykle mniejszy wskaźnik awaryjności niż metoda zliczania części. Ze względu na wysoki poziom analizy, metoda ta jest bardzo czasochłonna w porównaniu z innymi metodami lecz daje bardzo wiarygodne wskaźniki awaryjności analizowanych elementów elektronicznych obiektów technicznych co skłoniło do zastosowania tej metody przy prognozowaniu niezawodności obiektów technicznych w analizowanym systemie MSP.

Szacowanie obsługiwalności systemu (ang. *Maintainability Prediction*) zostało przeprowadzone z wykorzystaniem procedury V metody A standardu MIL-HDBK-472 i opisanych tam standardów, pozwala ona na oszacowanie czasów przestojów wywołanych czasami naprawy zgodnie z procedurami przedstawionymi w powyższym dokumencie, a w szczególności wyznaczenia średniego czasu naprawy MTTR.

2. PROGNOZOWANIE NIEZAWODNOŚCI ELEMENTÓW TECHNICZNYCH NA PRZYKŁADZIE PĘTLI PRZEJAZDOWEJ W SYSTEMIE POBORU OPŁAT

Zasadniczym elementem biorącym udział w procesie poboru opłat jest pętla przejazdowa montowana na punktach poboru opłat. Zadaniem pętli przejazdowej jest wykrycie obecności pojazdu na stanowisku poboru opłat. Ogólna zasada działania pętli przejazdowej opiera się na zmianie indukcyjności cewki wykonanej z przewodu pętli

indukcyjnej. Każda z pętli przejazdowych na wjeździe zasilana jest oddzielnym generatorem o innej częstotliwości. Generowane prądy wirowe w metalowych częściach pojazdu zmniejszają indukcyjność cewki zwiększając częstotliwość generatora. Każdej z pętli przypisany jest oddzielny miernik częstotliwości. Różnica między liczbą impulsów zliczonych w kolejnych cyklach pomiarowych jest miarą zmienności częstotliwości pętli. Wartość progowa częstotliwości pętli zależna jest od rodzaju pojazdu. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy pętli indukcyjnej [1] stosowanej w systemach poboru opłat na autostradach.



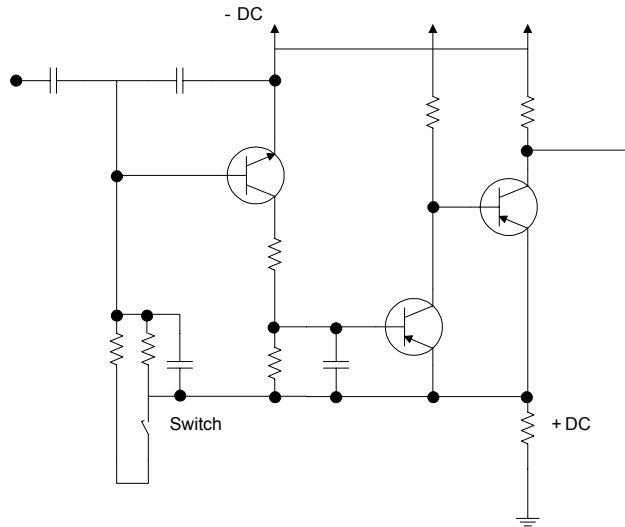
Rys. 1. Schemat blokowy systemu pętli indukcyjnych montowanych na stanowisku poboru opłat.

Stosując metodę analizy narażeń części na przykładzie oceny przewidywanego współczynnika uszkodzeń wzmacniacza wejściowego (Rys. 2.) pętli indukcyjnej, dla elementów rezystorowych, przyjęto następującą zależność [2]:

$$\lambda_p = \lambda_b \times \pi_T \times \pi_P \times \pi_S \times \pi_Q \times \pi_E [FPMH] \quad (1)$$

gdzie:

- λ_p – wskaźnik uszkodzeń części,
- λ_b – bazowy wskaźnik uszkodzeń,
- π_E – współczynnik środowiskowy,
- π_T – współczynnik oddziaływania temperatury,
- π_S – współczynnik obciążenia,
- π_P – współczynnik strat mocy,
- π_Q – współczynnik jakościowy,



Rys. 2. Schemat wzmacniacza wejściowego pętli indukcyjnej.

Dla rezystorów typu RC mamy [3]:

$$\lambda_b = 0,0017 \quad (2)$$

$$\pi_T = \exp\left(\frac{-Ea}{8,617 \times 10^{-5} \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{298}\right)}\right) = 1,137 \quad (3)$$

$$\pi_p = (\text{power dissipation})^{0,39} = (0,1)^{0,39} = 0,407 \quad (4)$$

$$\pi_s = 2,493 \quad (5)$$

$$\pi_Q = 10 \quad (6)$$

$$\pi_E = 1,0 \quad (7)$$

Stąd całkowity przewidywany wskaźnik uszkodzeń części dla 7 rezystorów typu RC wynosi:

$$\lambda_p = 0,0017 \times 1,137 \times 0,407 \times 2,493 \times 10 \times 1,0 \times 7 = 0,137 [FPMH] \quad (8)$$

Dla kondensatorów wzmacniacza wejściowego do oceny przewidywanego wskaźnika uszkodzeń mamy [3]:

$$\lambda_p = \lambda_b \times \pi_{cv} \times \pi_Q \times \pi_E \times \pi_T \times \pi_s \times \pi_{SR} [FPMH] \quad (9)$$

Analizując jak powyżej dla 4 kondensatorów typu CK mamy [4]:

$$\lambda_b = 0,00099 \quad (10)$$

$$\pi_{CV} = C^{0,09} = 0,1^{0,09} = 0,812 \quad (11)$$

$$\pi_Q = 10 \quad (12)$$

$$\pi_E = 1,0 \quad (13)$$

$$\pi_T = \exp\left(\frac{-Ea}{8,617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{298}\right)\right) = 1,25 \quad (14)$$

$$\pi_S = \left(\frac{S}{0,6}\right)^3 + 1 = \left(\frac{0,8}{0,6}\right)^3 + 1 = 3,37 \quad (15)$$

$$\pi_{SR} = 1,0 \quad (16)$$

Stąd całkowity przewidywany wskaźnik uszkodzeń części dla 4 kondensatorów typu CK wynosi:

$$\lambda_p = 0,00099 \times 0,812 \times 10 \times 1,25 \times 3,37 \times 1,0 \times 4 = 0,135 [FPMH] \quad (17)$$

Obliczając analogicznie jak powyżej dla wszystkich elementów można stwierdzić, że całkowity przewidywany wskaźnik uszkodzeń wzmacniacza wejściowego pętli indukcyjnej wynosi:

$$\lambda_{InAMP} = \lambda_p = 0,137 + 0,135 + 0,278 + 0,00629 = 0,56 [FPMH] \quad (18)$$

Analizując podobnie pozostałe obiekty techniczne będące składowymi pętli przejazdowej z wykorzystaniem środowiska oprogramowania w postaci programu Lambda Predict w wersji 3.01 firmy Reliasoft, otrzymano następujący przewidywany całkowity wskaźnik uszkodzeń:

$$\lambda_{Inductive\ loop} = 0,00652 + 0,56 + 0,437 + 1,160 + 0,163 + 7,068 + 0,15 = 9,544 [FPMH] \quad (19)$$

stąd:

$$MTBF_{Inductive\ loop} = \frac{1}{\lambda_{Inductive\ loop}} = 104\ 777,87 [hrs] \approx 105\ 000 [hrs] \quad (20)$$

3. PROGNOZOWANIE OBSŁUGIWALNOŚCI ELEMENTÓW TECHNICZNYCH NA PRZYKŁADZIE PĘTLI PRZEJAZDOWEJ W SYSTEMIE POBORU OPŁAT

Prognoza obsługiwalności systemu (ang. *Maintainability Prediction of the System*) została przeprowadzona na podstawie dokumentu MIL-HDBK-472, procedury V, metody A i opisanych tam standardów, pozwala na oszacowanie czasów przestojów wywołanych czasami naprawy zgodnie z procedurami przedstawionymi w powyższym dokumencie, a w szczególności wyznaczenia średniego czasu naprawy MTTR (ang. *Mean Time To Repair*).

Znając ilość części RI (ang. *Repleacable Items*) lub grupę części wymiennych (ang. *group of RI's*) w analizowanym systemie oraz ich przewidywane wskaźniki uszkodzeń możemy określić dla poszczególnego komponentu lub grupy komponentów parametry wskaźników obsługiwalności systemu.

Aby określić poprawnie obsługiwalność systemu należy uwzględnić następujące zadania obsługi systemu: Przygotowanie (ang. *Preparation*), Izolacja uszkodzenia (ang. *Fault Isolation*), Naprawa uszkodzenia (ang. *Fault Correction*). Czas potrzebny do wykonania powyższych zadań jest nazywany elementem MTTR. Poniżej w tabeli 1 przedstawiono definicje elementów MTTR [5].

Tabela 1.

Definicja elementów MTTR

| Element MTTR | Definicja |
|---|---|
| Przygotowanie ($T_{P_{nj}}$) | Czas związany z wykonaniem zadań przed procesem izolacji uszkodzenia w systemie |
| Izolacja uszkodzenia ($T_{FI_{nj}}$) | Czas związany z wykonaniem zadań potrzebnych w procesie izolowania uszkodzenia do uzyskania poziomu przy którym nastąpi poprawa zaistniałego uszkodzenia w systemie |
| Demontaż ($T_{D_{nj}}$) | Czas związany z uzyskaniem dostępu do części wymiennej RI lub identyfikacji wymiennego elementu uszkodzonego w systemie |
| Wymiana ($T_{I_{nj}}$) | Czas związany z usunięciem i zamianą uszkodzonego elementu lub elementu podejrzanego o wadliwe działanie |
| Montaż ($T_{R_{nj}}$) | Czas związany z montażem elementu wymienianego i zainstalowaniem go w systemie |
| Stabilizacja systemu ($T_{A_{nj}}$) | Czas związany ze stabilizacją systemu lub wymienionego elementu po jego zamontowaniu w systemie |
| Czas sprawdzania działania ($T_{C_{nj}}$) | Czas potrzebny na weryfikację poprawności działania systemu lub wymienionego elementu |
| Czas uruchomienia ($T_{ST_{nj}}$) | Czas potrzebny na zadziałanie systemu do poziomu jego operacyjności |

Na podstawie standardu Military Handbook: Maintainability Prediction. USA Department of Defense, MIL-HDBK-472 Notice 1 dla każdego z analizowanych elementów pętli indukcyjnej zdefiniowano czasy wykonania elementarnych procesów dla poszczególnych elementów MTTR [6].

Założono że w analizowanym systemie jakim jest pętla przejazdowa znajduje się 11 grup elementów wymiennych wraz z oszacowanymi powyżej wskaźnikami intensywności uszkodzeń zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1.

Podstawowy model predykcyjny zastosowany do obliczeń ma następującą postać:

$$MTTR_{Inductive\ loop} = T_{P_{nj}} + T_{FI_{nj}} + T_{D_{nj}} + T_{I_{nj}} + T_{R_{nj}} + T_{A_{nj}} + T_{C_{nj}} + T_{ST_{nj}} = \sum_{m=1}^M T_m \quad (21)$$

gdzie:

T_m - średni czas m -tego elementu MTTR

Analizując elementy pętli indukcyjnej z wykorzystaniem oprogramowania Item Toolkit w wersji 7.08 firmy Item Software, otrzymano całkowity przewidywany czas naprawy pętli indukcyjnej MTTR:

$$MTTR_{Inductive\ loop} = T_{P_{nj}} + T_{FI_{nj}} + T_{D_{nj}} + T_{I_{nj}} + T_{R_{nj}} + T_{A_{nj}} + T_{C_{nj}} + T_{ST_{nj}} = \sum_{m=1}^M T_m = 0,35 [hrs] \quad (22)$$

gdzie:

$$\mu_{Inductive\ loop} = \frac{1}{MTTR_{Inductive\ loop}} = 2,857 [hrs^{-1}] \quad (23)$$

4. WYZNACZENIE STACJONARNEJ GOTOWOŚCI POJEDYNCZEGO STANOWISKA SYSTEMU POBORU OPŁAT

Na podstawie działania pojedynczego stanowiska poboru opłat można stwierdzić że posiada ono niezawodnościową strukturę szeregową. Przyjęto, że obiekt składający się z n niezależnych elementów krytycznych ma strukturę szeregową. W chwili uszkodzenia jakiegokolwiek elementu następuje utrata zdolności obiektu i przejście w stan niezdatności. Element uszkodzony jest naprawiany. Naprawa elementu krytycznego przywraca mu pełną zdolność.

Macierz intensywności przejść dla pojedynczego stanowiska wjazdowego PPO ma postać:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -\mu_{14} & 0 & 0 & \mu_1 \\ 0 & -\mu_{24} & 0 & \mu_2 \\ 0 & 0 & -\mu_{34} & \mu_3 \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & \lambda \end{bmatrix} \quad (24)$$

Stąd stacjonarna gotowość dla pojedynczego stanowiska wjazdowego PPO ma postać:

$$K_{g\ wjazdowa} = P_4 = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^3 \frac{\lambda_{4j}}{\mu_{j4}}} \quad j = 1,2,3 \quad i = 1,2,3 \quad (25)$$

Uwzględniając powyżej oszacowane intensywności uszkodzeń i napraw dla pojedynczego stanowiska PPO mamy:

$$K_{g \text{ wjazdowa}} \approx 0,99863 \quad (26)$$

Dostępność (ang. *Availability*), czyli wymagany wskaźnik gotowości pojedynczego stanowiska w Systemie Poboru Opłat według przepisów normatywnych [7] wynosi:

$$A_{ST} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{4380}{4380 + 2} \approx 0,9995436 \quad (27)$$

5. WNIOSKI

Przedstawiona metodologia szacowania obsługiwalności i niezawodności obiektów technicznych manualnego systemu poboru opłat umożliwia ocenić system pod kątem przepisów normatywnych. Ocena systemu pozwala stwierdzić iż istnieje konieczność dostosowania strategii procesu eksploatacji manualnego systemu poboru opłat, która pozwala na spełnienie warunków określonych w standardach i przepisach normatywnych.

Bibliografia

1. United States Patent, Appl. No. 777,854 VEHICLE PRESENCE LOOP DETECTOR.
2. Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment. USA Department of Defense, MIL-HDBK-217F: 9.1 RESISTORS, 28.II.1995 r.
3. Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment. USA Department of Defense, MIL-HDBK-217F Notice 2: 9.1 RESISTORS, 28.II.1995 r.: Base Failure Rate – λ_b
4. Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment. USA Department of Defense, MIL-HDBK-217F Notice 2: 10.1 CAPACITORS, FIXED, CERAMIC, GENERAL PURPOSE 28.II.1995 r
5. Military Handbook: Maintainability Prediction. USA Department of Defense, MIL-HDBK-472 Notice 1 : 3.1 MTTR elements.
6. Military Handbook: Maintainability Prediction. USA Department of Defense, MIL-HDBK-472 Notice 1 : 3.1 MTTR elements, Table A-V-1 Elemental maintenance actions.
7. Podstawowe Wymagania Techniczne do Projektowania, Budowy, Eksploatacji i Zwrotu Autostrady opracowane przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad.

THE METHODOLOGY OF MAINTAINABILITY AND RELIABILITY PREDICTION OF THE TELEMATIC HIGHWAY SYSTEM IN THE AIM OF THE STUDY OF HIS EXPLOITATION STRATEGY

Abstract: The article presents the conception of the Parts Stress Analysis prediction method and Maintainability Prediction method procedures on the example of inductive loop in the toll collection system. The effect of the present study is the assignment of the stationary availability of the single station in toll collect system. The aim of the reliability and maintainability prediction is the analysis and evaluation of the system allowing to elaborate of the work schedule of the system together with the defined availability in the standards.

Keywords: The methods of predicting the reliability and maintainability of the technical objects, the toll collection system, the Parts Stress Analysis method.