

Paweł DROŹDZIEL
Leszek KRZYWONOS

OCENA NIEZAWODNOŚCI PIERWSZEGO DZIENNEGO ROZRUCHU SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM W WARUNKACH UŻYTKOWANIA POJAZDU

THE ESTIMATION OF THE RELIABILITY OF THE FIRST DAILY DIESEL ENGINE START-UP DURING ITS OPERATION IN THE VEHICLE

W artykule zaprezentowano opracowany przez autorów stochastyczny model przebiegu rozruchu silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym. Przedstawiono założenia, które w oparciu o analizę zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika i natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, pozwoliły wyróżnić w przebiegu rozruchu silnika spalinowego charakterystyczne etapy i zredukować ciągłą przestrzeń stanów procesu rzeczywistego do zbioru skończonego. Ogólny model wykorzystano do opisu przebiegu tzw. pierwszego dziennego rozruchu silnika. Przyjmując założenie, że prawdopodobieństwo znalezienia się w przyszłości w określonym stanie zależy jedynie od stanu, w którym obiekt znajduje się w chwili obecnej, do opisu matematycznego zastosowano jednorodny dyskretny proces Markowa. W dalszej części artykułu pokazano sposób wyznaczenia macierzy intensywności przejścia tego procesu na podstawie wyników badań eksploatacyjnych przebiegu rozruchu silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym. Ponadto przedstawiono rozwiązania równań Chapmana-Kolmogorowa, które pozwalają ocenić prawdopodobieństwo zaistnienia udanego pierwszego rozruchu dziennego po upływie założonego czasu jego trwania. W uwagach końcowych zasygnalizowano kierunki dalszej ewolucji prezentowanego modelu oraz możliwości jego zastosowań praktycznych w diagnostyce silników samochodowych.

Słowa kluczowe: rozruch silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, pierwszy dzienny rozruch silnika, proces Markowa.

This article presents the mathematical model of the course of the diesel engine start-up which is worked out by the authors. The analysis of the course of the changes of the engine crankshaft angular velocity, as well as of the current consumed by the starter at the stage of meshing the starter with the crankshaft flywheel allows to enumerate some characteristic stages and to reduce the continuous space of the real start-up process to the finite set in the course of the engine start-up. The general model can be used to describe the course of the first daily engine start-up. The authors accept the assumption, that the probability that the object will occur in the future in the definite state depends only on the state in which the object is at present. The homogeneous continuous time Markov process can be used for the mathematical description. In the next part of the article the authors show the manner of determination of the transition intensity matrix of this process basing on the empirical research of the vehicle diesel engine start-ups. Furthermore the solutions of the Chapman-Kolmogorov equations, which can allow to estimate the probability of the successful first daily engine start-up after the definite time of its duration, are shown in the paper. In the summary the directions of the evolution of the presented model and the possibility of its practical apply in the vehicle engine diagnosis are mentioned.

Keywords: diesel engine start-up, first daily start-up, Markov process.

1. Wstęp

Rozruchowi samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym towarzyszą procesy fizyko-chemiczne, które prowadzą do stopniowej degradacji stanu technicznego silnika oraz negatywnie oddziałują na środowisko. Z powodu niedostatecznego smarowania (spowodowanego przede wszystkim bezwładnością układu olejenia), dużej lepkości oleju smarującego (szcze-

1. Introduction

During the start-up of the vehicle diesel engine, numerous phenomena and processes may be observed which conduct to consistent worsening of the engine technical state and have a negative impact on its surroundings. While the engine starts up, due to the insufficient lubrication caused by inertia in the lubrication system, the high viscosity of the lubricating oil (par-

gólnie w obniżonych temperaturach) oraz zbyt małej prędkości względnej przemieszczających się elementów następuje wzrost intensywności zużywania w parach tribologicznych silnika [5,6]. Z kolei słabe rozpylenie i odparowanie w cylindrach silnika pierwszych dawek paliwa wywołuje wypadanie samozapłonów, a także niecałkowite i niepełne spalanie bogatej w paliwo mieszanki palnej (czego efektem jest zwiększenie emisji toksycznych składników spalin do atmosfery) [7,8].

Pogarszanie się stanu technicznego silnika wraz z upływem czasu eksploatacji prowadzi do wydłużenia czasu trwania rozruchu, szczególnie gdy rozruch wykonywany jest w obniżonej temperaturze otoczenia. Czas trwania rozruchu jest sygnałem diagnostycznym, który może być stosowany w analizie niezawodności. „Najczystsza” informację diagnostyczną noszą tzw. **pierwsze dzienne rozruchy** silnika. W warunkach eksploatacyjnych pierwszy dzienne rozruch silnika występuje po trwającym co najmniej 8 godzin postoju pojazdu na otwartej przestrzeni lub w pomieszczeniu garażowym. Temperatura silnika spalinyowego jest wówczas taka sama jak temperatura powietrza otaczającego pojazd [1].

W niniejszym artykule przedstawiono model matematyczny przebiegu pierwszego dziennego rozruchu silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym oraz pokazano zastosowanie tego modelu w analizie wyników badań eksploatacyjnych rozruchu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN. Wynikiem obliczeń jest empiryczna zależność prawdopodobieństwa zaistnienia udanego rozruchu w funkcji długości czasu jego trwania, charakteryzująca stan techniczny silnika badanego samochodu.

2. Stochastyczny model przebiegu pierwszego dziennego rozruchu silnika samochodowego

W opracowanym modelu założono, że w procesie przebiegu pierwszego dziennego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym można wyróżnić 6 zasadniczych stanów. Stany te opisano kolejnymi liczbami całkowitymi nieujemnymi 0, 1, ..., 5, w taki sposób, że stan „0” jest stanem, w którym silnik znajduje się w spoczynku, lecz trwają działania przygotowawcze związane z rozruchem (np. nagrzewanie świecy żarowej), stany „1”, „2”, „3” i „4” odpowiadają opisanym w monografii [1] etapom 1—4 rozruchu, zaś stan „5” jest stanem samodzielnego działania silnika. Stan „1” rozpoczyna się w chwili sprzęgnięcia zębniaka rozrusznika elektrycznego z kołem zamachowym wału korbowego silnika i trwa aż do osiągnięcia przez wał silnika niemal stałej prędkości obrotowej. Okres napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik z prawie stałą prędkością jest sklasyfikowany jako stan „2”. Stan „3” to etap występowania nieregularnego spalania mieszanki w cylindrach silnika wraz z przerywaną pracą rozrusznika. W stanie „4” występują już tylko same zapłony mieszanki, zaś prędkość kątowa wału korbowego, po początkowym szybkim wzroście i osiągnięciu maksimum lokalnego, stabilizuje się. Przejście do stanu „5” klasyfikuje się jako udany rozruch silnika [1].

W omawianym modelu przyjęto dopuszczalne przejścia pomiędzy stanami zgodnie z grafem przedstawionym na rys. 1. Założono ponadto, że proces przebiegu zmian stanu w czasie trwania rozruchu spełnia kryteria jednorodnego dyskretnego procesu Markowa z czasem ciągłym [4].

Zbiór S stanów tego procesu jest zbiorem sześcioelementowym:

$$S = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\} \quad (1)$$

ticularly at low temperatures), as well as too low relative velocity of its moving parts and the intensity of wear and tear of its tribological pairs increase [5,6]. During the engine start-up, the atomizing and vaporization of the fuel may also be too little, which causes misfiring of the self-ignition, as well as incomplete combustion of the air-fuel mixture rich in fuel within the combustion cylinders. It causes an increased emission of the toxic components in the exhaust gases to the atmosphere [7,8].

The deterioration in the engine technical state, connected with the time of the vehicle operation time, conducts to the increase of the time of the engine start-up particularly in lower temperature of the surrounding. The time of the start-up is a diagnostic signal which can be used in the reliability analysis. The **first daily start-up** carries the „clean” diagnostic information. During the vehicle operation the first daily start-up of the diesel engine takes place after minimum 8-hours vehicle standstill in the open air or in a building. The temperature of the first daily start-up of a diesel engine equals the vehicle ambient temperature [1].

This article presents the mathematical model of the course of the first daily diesel engine start-up and the application of this model in the analysis of the results of the empirical research of the LUBLIN vehicle and its 4CT90 diesel engine. The result of the calculation is the empirical relationship of the probability of the appearance of the successful start-up in the function of its duration, which characterises the technical state of the tested engine.

2. The stochastic model of the course of the first daily engine start-up

In this model, it was supposed that in the process of the course of the first daily diesel engine start-up we can indicate six essential states. These states describe consecutive non-negative integers: 0, 1, ..., 5. The state „0” is a state of the engine standstill but some preparatory activities connected with the start-up last (for example the heating by the pre-ignition plug). The states „1”, „2”, „3” and „4” match the stages of the engine start-up process which are described in the monograph [1]. The state „5” is the state when the engine works on its own.

The state „1” begins when the pinion of the electric starter couples with the engine crankshaft flywheel. It puts the engine movable mechanism into motion. The period when the crankshaft turns with nearly constant angular velocity with the help of the starter is classified as the state „2”. During the state „3”, irregular combustion of air-fuel mixture in the engine cylinders may be observed, as well as the misfiring of the starter work. The state „4” consists of the air-fuel mixture ignitions alone, as well as the angular velocity of the crankshaft which, after an initial rapid increase and achieving local maximum, stabilizes at the constant level [1]. The transition to the state „5” is classified as the successful engine start-up.

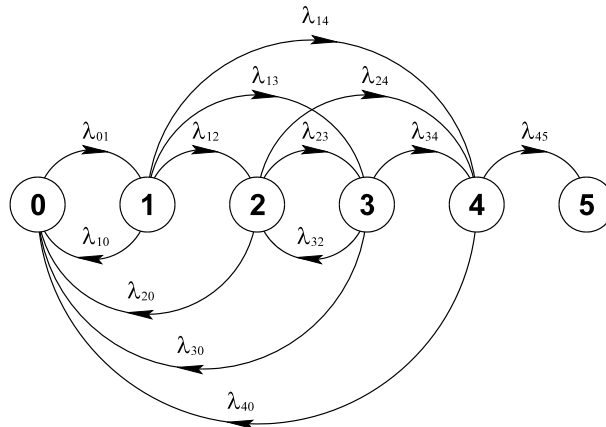
In the discussed model the allowed transitions between states are shown on the graph on the figure 1. The authors assume that the process of the course of the states changes during the engine start-up meets the criteria of the time-homogeneous continuous time Markov chain [4].

The set S of possible values of this process consists of six elements:

$$S = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\} \quad (1)$$

Niezawodność rozruchu określają rozkłady zmiennych losowych $X(t)$, $t \geq 0$ (t – czas), które mogą przyjmować wartości ze zbioru S stanów procesu. W jednorodnym procesie Markowa intensywności przejść pomiędzy stanami nie zależą od czasu. Założenie jednorodności jest uzasadnione, jeśli rozpatruje się pierwsze dzienne rozruchy silnika w trakcie eksploatacji samochodu. Macierz intensywności Λ procesu pokazanego na rys. 1 jest macierzą liczbową:

The reliability of the engine start-up is defined by the distributions of the random variables $X(t)$, $t \geq 0$ (t – time), which can receive the values from the S set of the state process. In the time-homogeneous Markov process the intensity transitions between states don't depend on the time. The transition intensity matrix Λ of the process, which is shown on the figure 1, is the numerical matrix:



Rys. 1. Graf przejść jednorodnego dyskretnego procesu Markowa (λ_{ij} – intensywność przejścia ze stanu i -tego w stan j -ty; $i, j \in S$, $i \neq j$) [2]
 Fig. 1. The digraph of the transition of the homogeneous Markov chain (λ_{ij} – the transition intensity from state i to state j ; $i, j \in S$, $i \neq j$) [2]

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{00} & \lambda_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{10} & \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & 0 \\ \lambda_{20} & 0 & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & 0 \\ \lambda_{30} & 0 & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \lambda_{34} & 0 \\ \lambda_{40} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{44} & \lambda_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{55} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{00} & \lambda_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{10} & \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & 0 \\ \lambda_{20} & 0 & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & 0 \\ \lambda_{30} & 0 & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \lambda_{34} & 0 \\ \lambda_{40} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{44} & \lambda_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{55} \end{bmatrix} \quad (2)$$

której elementy diagonalne spełniają zależności:

$$\lambda_{ii} = - \sum_{k \in S - \{i\}} \lambda_{ik} \quad i \in S. \quad (3)$$

Stąd:

$$\lambda_{00} = -\lambda_{01}, \lambda_{11} = -(\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}), \lambda_{22} = -(\lambda_{20} + \lambda_{23} + \lambda_{24}), \\ \lambda_{33} = -(\lambda_{30} + \lambda_{32} + \lambda_{34}), \lambda_{44} = -(\lambda_{40} + \lambda_{45}), \lambda_{55} = 0.$$

Silniki znajdujące się w bardzo dobrym stanie technicznym mają udany pierwszy dzienny rozruch z prawdopodobieństwem równym 1. Oznacza to, że wówczas nie obserwuje się powrotów do stanu „0” ze stanów „1”, „2”, „3” i „4”. W tym przypadku można założyć a priori, że $\lambda_{10} = \lambda_{20} = \lambda_{30} = \lambda_{40} = 0$.

Macierz Λ intensywności przejść zawiera wszystkie informacje o probabilistycznych charakterystykach dyskretnego procesu Markowa $\{X(t); t \geq 0\}$, którego graf pokazano na rys. 1. W opisanym modelu przebiegu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym można przyjąć, że czas T_{jk} przebywania obiektu w stanie j -tym przed bezpośrednim przejściem do stanu k -tego posiada rozkład wykładniczy z parametrem λ_{jk} , dla każdej pary wskaźników $(j, k) \in S^2$ i $j \neq k$. Wartość parametru rozkładu wykładniczego można wyznaczyć estymując wartość oczekiwaną zmiennej losowej T_{jk} , gdyż:

the diagonal elements of this matrix (2) perform the formula:

$$\lambda_{ii} = - \sum_{k \in S - \{i\}} \lambda_{ik} \quad i \in S. \quad (3)$$

so:

$$\lambda_{00} = -\lambda_{01}, \lambda_{11} = -(\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}), \lambda_{22} = -(\lambda_{20} + \lambda_{23} + \lambda_{24}), \\ \lambda_{33} = -(\lambda_{30} + \lambda_{32} + \lambda_{34}), \lambda_{44} = -(\lambda_{40} + \lambda_{45}), \lambda_{55} = 0.$$

The engines which are in very good technical state have the successful first daily start-up with the probability equal one. It means that we can't observe the returns to the state „0” from the states „1”, „2”, „3” and „4”. In this case we can assume a priori, that $\lambda_{10} = \lambda_{20} = \lambda_{30} = \lambda_{40} = 0$.

The transition intensity matrix includes all informations about the Markov chain probabilistic characteristic $\{X(t); t \geq 0\}$ what is shown on the graph from the figure 1. In the considered model of the diesel engine start-up process we can accept that the time T_{jk} of the object being in the state j before immediate transition to the state k is exponentially distributed with the parameter λ_{jk} , for every pair $(j, k) \in S^2$ and $j \neq k$. The value of the λ_{jk} can be assigned from the estimation of the expectation value of the random variable T_{jk} because:

$$ET_{jk} = \frac{1}{\lambda_{jk}} \quad (4)$$

(E – operator wartości oczekiwanej). Estymatorem wartości oczekiwanej jest średnia arytmetyczna z próby. Stąd:

$$\lambda_{jk} = \frac{n}{\sum_{s=1}^n t_{jk}^{(s)}} \quad (5)$$

gdzie n jest liczebnością próby losowej, zaś $t_{jk}^{(s)}$ – zmierzonym w s -tej realizacji czasem przebywania obiektu w stanie j -tym przed przejściem bezpośrednio do stanu k -tego.

W rozważanym modelu, wektor prawdopodobieństwa:

$$\mathbf{P}(t) = (P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t)) \quad (6)$$

którego składowe $P_i(t) = \Pr\{X(t) = i\}$, $i \in S$, określają prawdopodobieństwo przebywania obiektu w stanie i -tym w ustalonej chwili czasu t ($t \geq 0$), spełnia równanie Chapmana-Kołmogorowa:

$$\mathbf{P}'(t) = \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{P}(t) \cdot \Lambda \quad (7)$$

przy warunku początkowym:

$$\mathbf{P}(0) = (1, 0, 0, 0, 0, 0). \quad (8)$$

Ponadto w każdej chwili $t \geq 0$ czasu trwania rozruchu składowe wektora $\mathbf{P}(t)$ spełniają warunek normujący:

$$\sum_{i \in S} P_i(t) = 1 \quad (9)$$

Postępując zgodnie z procedurą podaną w artykule [2], otrzymuje się rozwiązanie równania (7) w postaci:

$$\mathbf{P}(t) = [\mathbf{B} \cdot \exp(\mathbf{r}t)]^T, \quad (10)$$

gdzie symbol \mathbf{M}^T oznacza transponowaną macierz \mathbf{M} ,

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

jest wektorem wartości własnych macierzy Λ , zaś

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{01} & b_{02} & b_{03} & b_{04} & b_{05} & b_{06} \\ b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \end{bmatrix} \quad (12)$$

jest macierzą stałych współczynników, jednoznacznie określonych przez składowe wektora \mathbf{r} oraz warunek (8).

$$ET_{jk} = \frac{1}{\lambda_{jk}} \quad (4)$$

(E – the operator of the expected value). The estimator of the expected value is average from the trial. That is why:

$$\lambda_{jk} = \frac{n}{\sum_{s=1}^n t_{jk}^{(s)}} \quad (5)$$

where n is the number of the random test and $t_{jk}^{(s)}$ is the time when the object is in the state j before immediate transition to the state k measured in s realization.

In the considered model the vector of the probability:

$$\mathbf{P}(t) = (P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t)) \quad (6)$$

which components $P_i(t) = \Pr\{X(t) = i\}$, $i \in S$, determinate the probability that the object is in the state i , in the fixed point of the time $t \geq 0$, which performs the Chapman-Kolmogorov equation:

$$\mathbf{P}'(t) = \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{P}(t) \cdot \Lambda \quad (7)$$

with the initial condition:

$$\mathbf{P}(0) = (1, 0, 0, 0, 0, 0). \quad (8)$$

Moreover the components of the vector $\mathbf{P}(t)$ in every point of the start-up time $t \geq 0$ perform the standard condition:

$$\sum_{i \in S} P_i(t) = 1 \quad (9)$$

According to the procedure described in the publication [2], we can receive the solution of the equation (7) in the form:

$$\mathbf{P}(t) = [\mathbf{B} \cdot \exp(\mathbf{r}t)]^T, \quad (10)$$

where the notation \mathbf{M}^T denotes the transposed matrix \mathbf{M} ,

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

is the eigenvector of the matrix Λ , whereas

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{01} & b_{02} & b_{03} & b_{04} & b_{05} & b_{06} \\ b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \end{bmatrix} \quad (12)$$

is the matrix of the constant coefficients, explicitly defined by the elements of the vector \mathbf{r} and condition (8).

3. Ocena niezawodności pierwszego dziennego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

Zaprezentowany model przebiegu pierwszego dziennego rozruchu silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym zastosowano do opisu przebiegu rozruchu silnika 4CT90 samochodu dostawczego marki Lublin. Dane do obliczeń uzyskano na podstawie nadzorowanych badań eksploatacyjnych samochodu użytkowanego w przedsiębiorstwie Poczta Polska w Lublinie, mającego przebieg 400 000 km [3].

Empiryczną macierz Λ intensywności przejścia procesu Markowa wyznaczono z zależności (3) i (5). W rozważanym przypadku uzyskano macierz:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -0,041 & 0,041 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -15,020 & 7,978 & 7,042 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5,816 & 4,043 & 1,772 & 0 \\ 0 & 0 & 6,944 & -14,696 & 7,752 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,557 & 0,557 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

(przy liczności próby losowej $n = 56$ realizacji). Wektorem własnym macierzy (13) jest wektor:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} -0,041 \\ -15,020 \\ -34,339 \\ -6,685 \\ -0,557 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

natomiast macierz \mathbf{B} stałych współczynników jest równa:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,003 & -0,003 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,037 & 0,002 & -0,001 & -0,001 & -0,037 & 0 \\ -0,003 & 0,002 & 0 & -0,006 & 0,007 & 0 \\ 0,052 & -0,001 & 0 & 0,008 & -0,059 & 0 \\ -1,089 & 0 & 0,001 & -0,001 & 0,089 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Zgodnie z zależnościami (9) i (10) prawdopodobieństwo zaistnienia udanego rozruchu po upływie czasu t wyraża się wzorem:

$$P_5(t) = 1 - 1,089 \cdot e^{-0,041t} + 0,001 \cdot e^{-34,339t} - 0,001 \cdot e^{-6,685t} + 0,089 \cdot e^{-0,557t} \quad (16)$$

Wykres zależności (16) przedstawia rys. 2.

Z wyrażenia (16) i wartości macierzy (13) wynika, że o długości trwania rozruchu decyduje czas przebywania obiektu w stanie „0” przed bezpośrednim przejściem do stanu „1”, decydujący o intensywności λ_{01} . Dla badanego pojazdu LUBLIN czas ten zależy od czasu podgrzewania silnika przy pomocy świecy żarowej, który jest znacząco dłuższy niż sumaryczny czas trwania pozostałych wyróżnionych etapów rozruchu. Tym

3. The estimation of the reliability of the first daily diesel engine start-up

The presented model of the course of the diesel engine start-up process was applied to describe the first daily engine 4CT90 start-up of the delivery truck LUBLIN which has 400 000 km mileage. The data for calculation were obtained by the author during the empirical researches in the Polish Post Branch in Lublin [3].

The empirical matrix Λ of the transition intensity of the Markov process was defined from the equations (3) and (5). In the considered case the following matrix was obtained:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -0,041 & 0,041 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -15,020 & 7,978 & 7,042 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5,816 & 4,043 & 1,772 & 0 \\ 0 & 0 & 6,944 & -14,696 & 7,752 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,557 & 0,557 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

(when the numbers of the random sample are $n = 56$ realizations). The eigenvector of the matrix (13) is the vector:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} -0,041 \\ -15,020 \\ -34,339 \\ -6,685 \\ -0,557 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

and the matrix \mathbf{B} of the constant coefficients is equal:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,003 & -0,003 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,037 & 0,002 & -0,001 & -0,001 & -0,037 & 0 \\ -0,003 & 0,002 & 0 & -0,006 & 0,007 & 0 \\ 0,052 & -0,001 & 0 & 0,008 & -0,059 & 0 \\ -1,089 & 0 & 0,001 & -0,001 & 0,089 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

According to the relations (9) and (10) the probability of the appearance of the successful engine start-up after the time t is equal:

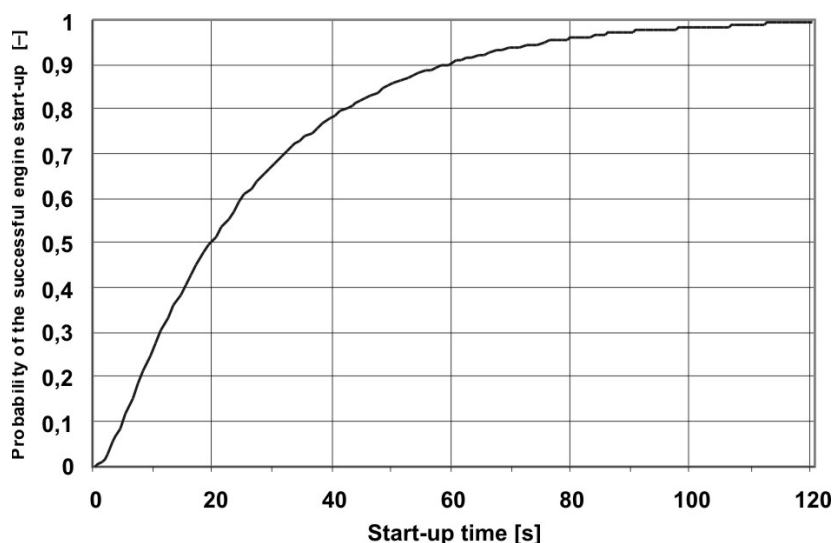
$$P_5(t) = 1 - 1,089 \cdot e^{-0,041t} + 0,001 \cdot e^{-34,339t} - 0,001 \cdot e^{-6,685t} + 0,089 \cdot e^{-0,557t} \quad (16)$$

The figure 2 shows the graph of the relation (16).

The time of the engine standstill before the direct transition to the state „1” determines the value of the start-up time what is the result of the relation (16) and the value of the matrix (13). This time decides on the intensity λ_{01} . For the investigated vehicle this time depends on the time of the heating by the pre-ignition plug of the engine before its start-up. This time is

należy tłumaczyć przekroczenie wartości 0,85 prawdopodobieństwa zaistnienia udanego rozruchu dopiero po 50 sekundach od włączenia świecy żarowej, co można zobaczyć na rys. 2.

more significant than the summary times of the other stages of the engine start-up which occur in the exceed of the 0,85 of the probability of the successful diesel 4CT90 engine start-up 50 s after the moment of the pre-ignition plug inclusion (fig. 2).



Rys. 2. Prawdopodobieństwo zaistnienia udanego pierwszego dziennego rozruchu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN w funkcji czasu trwania rozruchu w warunkach nadzorowanej eksploatacji

Fig 2. The probability of the first daily successful diesel 4CT90 engine start-up of the delivery truck LUBLIN in the function of the start-up duration in the empirical conditions

4. Uwagi końcowe

Opisany w artykule model pierwszego dziennego rozruchu silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym pozwala na wyznaczenie empirycznej zależności prawdopodobieństwa udanego rozruchu w zależności od czasu jego trwania dla obiektów znajdujących się w dobrym stanie technicznym. Uzyskana w ten sposób charakterystyka umożliwia porównywanie stanu technicznego obiektów tej samej populacji na podstawie wrywkowej kontroli czasu trwania rozruchu. W ten sposób można budować system oceny stanu technicznego silników samochodów tej samej marki, eksploatowanych w tym samym przedsiębiorstwie transportowym.

Model pierwszego dziennego rozruchu można dostosować do opisu sytuacji, w której istnieje niezerowe prawdopodobieństwo wystąpienia nieudanego rozruchu. Wymaga to wprowadzenia dodatkowego stanu pochłaniającego, reprezentującego nieudany rozruch silnika.

Z naukowego punktu widzenia interesującym zagadnieniem jest określenie zmian prawdopodobieństwa udanego pierwszego dziennego rozruchu w funkcji czasu trwania rozruchu i temperatury otoczenia. Zaprezentowany w artykule model można zastosować do analizy wyników doświadczalnych odpowiednio zaplanowanego eksperymentu.

4. Final remarks

The model of the first daily vehicle diesel engine start-up, which is described in this paper, allows to determine the empirical relationship between probability of the successful start-up in the dependence of its duration for the engines in the proper technical state. The characteristic obtained in such way allows to compare the technical state of the object in the same population basing on the random control of the time of the engine start-up. This way we can build the system of estimation of the technical state of the identical types of engines, which are operated in the same transport firm.

The model of the first daily engine start-up can be adjusted to the description of the situation in which the nonzero probability of the appearance of the unsuccessful engine start-up exists. It demands that we introduce the additional absorb state, which represents the unsuccessful engine start-up. The changes of the value of the probability of the successful first daily engine start-up in the function of its duration and its surrounding temperature are scientifically very interesting. The model described in this paper can be also used for analysis of the results of the special planned scientific experiment.

5. References

- [1] Drożdź P. and others: *Wybrane zagadnienia rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*. Polish Maintenance Society, Warszawa, 2007. (in Polish)
- [2] Drożdź P., Krzywonos L.: *The use of the start-up process analysis in the estimation of the technical state of diesel engine*. Diagnostyka, Nr 3(43)/2007, pp. 11—14.

- [3] Drożdziel P. and others: *Widmo rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym jako nowe kryterium oceny warunków eksploatacji samochodu*. Raport Merytoryczny z realizacji projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Lubelskiej, Politechnika Lubelska, Lublin, 2007 (research report, in Polish).
- [4] Ertunc H. M., Oysu C.: *Drill wear monitoring using cutting force signals*. *Mechatronics* 14 (2004), pp. 533—548.
- [5] Naylor M., Kadali P., Wang J.: *Diesel engine tribology*. *Modern Tribology Handbook*. Chapter 33. Vol. I & II. CRC Press LCC, 2001.
- [6] Urs M., Mohr M., Forss A. M.: *Comprehensive particle characterization of modern gasoline and diesel passenger cars at low ambient temperature*. *Atmospheric Environment*, No. 39 (2005), pp. 107—117.
- [7] Weilenmann M., Soltic P., Saxer Ch., Forss A. M., Heeb N.: *Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold start emissions at different temperature*. *Atmospheric Environment*. No. 39 (2005), pp. 2433—2441.
- [8] Xu G. H., Lee J. H., Liang H., Georing D.: *Tribological properties of solid-lubricating coating on cylinder bore at low temperature*. *Wear*, No 257 (2004), pp. 59—65.

Dr hab. inż. Paweł DROŹDZIEL, prof. nadzw.

Dr inż. Leszek KRZYWONOS

Politechnika Lubelska

Wydział Mechaniczny

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska

tel. +48 815-384-200,

email: p.drozdziel@pollub.pl;

email: l.krzywonos@pollub.pl
