

METHOD OF AVAILABILITY CONTROL IN THE TRANSPORT SYSTEM USING SIMULATION MODEL OF OPERATION AND MAINTENANCE PROCESS

METODA STEROWANIA GOTOWOŚCIĄ W SYSTEMIE TRANSPORTOWYM Z ZASTOSOWANIEM MODELU SYMULACJI PROCESU EKSPLOATACJI

Klaudiusz Migawa¹⁾, Andrzej Neubauer²⁾, Łukasz Muślewski¹⁾,
Bogdan Landowski¹⁾

¹⁾ UTP University of Science and Technology, Bydgoszcz, Poland

²⁾ Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland

Abstract: *The paper presents the description of algorithm for calculation characteristics of simulation model for the operation and maintenance process of transport means. The model presented in the paper constitutes an integral element of the developed complex method of quality control in elaborate technical object performance systems. In the example presented in the paper, the evaluation criteria consist of the availability of technical object as well as unit profit generated in the states of the modeled operation and maintenance process. On the basis of the results of research carried out at an existing operation and maintenance system, entry data for the model were obtained and simulation experiments were carried out.*

Keywords: *simulation model, availability, unit profit, transport means*

Streszczenie: *W artykule przedstawiono opis algorytmu wyznaczania charakterystyk modelu symulacyjnego procesu eksploatacji środków transportu. Prezentowany model symulacji procesu eksploatacji stanowi element składowy opracowanej kompleksowej metody sterowania jakością działania złożonych systemów eksploatacji. W prezentowanym przykładzie kryteriami oceny są gotowość obiektu technicznego oraz dochód jednostkowy generowany w stanach modelowanego procesu eksploatacji. Na podstawie wyników badań zrealizowanych w rzeczywistym systemie eksploatacji, opracowano dane wejściowe modelu oraz wykonano eksperymenty symulacyjne.*

Słowa kluczowe: *model symulacyjny, gotowość, dochód jednostkowy, środki transportu*

METHOD OF AVAILABILITY CONTROL IN THE TRANSPORT SYSTEM USING SIMULATION MODEL OF OPERATION AND MAINTENANCE PROCESS

1. Introduction

The problem of controlling operation process carried out at complex technical systems on the basis of a selected criterion of evaluation is presented in many papers [1, 2, 3, 8]. Depending on the kind of analyzed research problems, appropriate mathematical models as well as methods of delineating optimal and quasi-optimal solutions were implemented. Due to a significant complexity of processes carried out in existing systems of technical objects operation, there appears the need to implement appropriate methods and tools, including stochastic models [1, 4, 5] as well as computer simulation programs providing effective carrying out of the tests of the models of analyzed operation processes as well as an analysis of results obtained [6, 7, 9].

One of the methods enabling detailed and effective assessment and control of operation quality of complex systems of engineering objects including: systems of machine tools, construction machines, transportation means and all kinds of engineering equipment, is application of simulation models for a description and analysis of the processes connected with operation and maintenance of these systems. These models provide the possibility of assessment and control of operation of complex technical objects according to selected criteria such as costs, profit, reliability, availability, safety, efficiency, etc.

This work presents the results of quality assessment of operation of a real technical system provided by studying the event model of operation and maintenance of the considered real technical system of this process. The event model was built on the basis of an analysis of technical objects space of states and operational events (transportation means) in the analyzed real technical system.

2. Event model of operation and maintenance process of transport means

The paper presents event model of the analyzed transport means operation and maintenance process. Due to the identification of the analyzed operation and maintenance process of transport means, crucial operation states of the process as well as possible transfers between the defined states were designated. Based on this, a graph was created, depicting the changes of operation and maintenance process states, shown in figure 1.

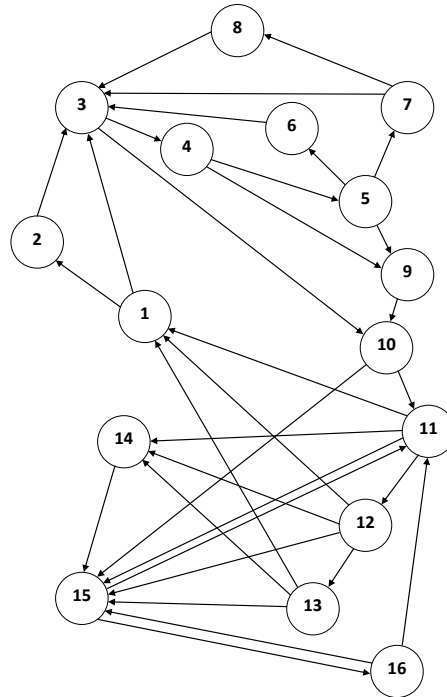


Fig. 1 Directed graph representing the transport means operation and maintenance process

1 – awaiting at the bus depot parking space, **2** – repair at the bus depot parking space, **3** – carrying out of the transport task, **4** – a break in task performance caused by damage, **5** – diagnosing by technical service unit, **6** – repair by the technical service unit without losing a ride, **7** – repair by the technical service unit with losing a ride, **8** – awaiting the start of task realization after technical service unit repair, **9** – emergency exit, **10** – waiting to enter the maintenance subsystem, **11** – refuelling, **12** – maintenance check on the operation day, **13** – realization of periodical servicing, **14** – prior to repair diagnosing in the serviceability assurance subsystem, **15** – repair in the serviceability assurance subsystem, **16** – diagnosing after the repair in the serviceability assurance subsystem

3. Program for the operation and maintenance process model simulation

Significant complexity of the modeled operation processes carried out in real systems of technical objects operation and maintenance involves the need to use appropriate methods and tools including computer simulation programs providing the possibility of effective studies of models representing the operation processes and an analysis of the obtained results.

In order to provide the possibility of considering different computational variants, e.g. through changing the parameters of the modeled process or a number of analyzed technical objects, a program has been created for simulation of a model of technical objects operation process.

The simulation program has been written in: *R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.*

The program developed for simulation of the operation process makes it possible to perform simulation experiments for different numbers of operational events (changes in the process states), intervals of simulation time both for an individual technical object and a group of technical objects. In the simulation program, successive duration times of the operation process states are determined by generating pseudorandom numbers yielding values from exponential, gamma, normal, logarithmic-normal and Weibull distributions. The structure of the simulation program was created so that the simulation experiment will be able to reflect a set of the analyzed technical objects and the sequence of events happening to each technical object in the analyzed real system.

In order to carry out a simulation experiment it is necessary to prepare a set of defined input data:

- a) DO (general data characterizing the simulation experiment):
- LOT – number of technical objects used in the simulation experiment,
 - LZ – number of a technical object events in the simulation experiment,
 - m – number of the process states, defined on the basis of a set of the modeled operation process states $S = \{1, 2, \dots, m\}$,
 - LD – number of decisions possible to be made in particular states of the modeled operation process,
 - $L\delta$ – number of strategies δ possible to be used in the simulation experiment;

Strategy δ is understood as a sequence which is expressed by vectors consisting of decisions $d_i^{(k)}(t_n)$ made in particular states of process $X(t)$, in successive times t_n of these states changes

$$\delta = \left\{ \left[d_1^{(k)}(t_n), d_2^{(k)}(t_n), \dots, d_m^{(k)}(t_n) \right] : n = 0, 1, 2, \dots \right\}. \quad (1)$$

If the decisions are made in the successive states of the process they do not depend on time t_n , in which they are made, that is, $d_i^{(k)}(t_n) = d_i^{(k)}$, then strategy δ is called stationary

$$\delta = \left[d_1^{(k)}, d_2^{(k)}, \dots, d_m^{(k)} \right]. \quad (2)$$

- b) RP (the process initial distribution):
Stochastic vector with the number of components equal to the number of the modeled operation process states, defining distribution of probability of the object's being in the states of the modeled operation process at the beginning of the simulation process.
- c) P (matrix of probabilities of the process states changes):
Square matrix of the degree equal to the number of states of the modeled operation process where each row is a stochastic vector describing the distribution of the process states change probabilities under the condition that the current state of the process is determined by the number of the row.
- d) PD (matrix of probability of decision choice in the process states):
Square matrix with the number of rows equal to the number of states of the modeled operation process and the number of columns equal to the number of possible decisions in each state of the modeled process consisting of stochastic rows defining distributions of decision making probability when a technical object enters a given state of the modeled process. In the case of application of deterministic strategy δ , the values of matrix $PD(\delta)$ determine a stationary vector whose components are numerical codes concerning deterministic decisions used in particular states of the modeled process states.
- e) TR, PR (types and parameters of time distributions of being in particular states of the process):
The developed program contains functions generating values from exponential, gamma, normal, logarithmic-normal and Weibull distributions with specified parameters.
- f) CC (matrix of unit profit in the process states):
A rectangular matrix with a number of rows equal to the number of the modeled operation process states and the number of columns equal to the number of possible decisions to be made in each state of the process in which for each state and each decision possible to be made in a given state (at the crossing of a row and a column), the value of unit profit is determined (per time unit) generated when the object is in a given state (determined by the row number), for decision making (determined by the number of the column).
- g) S_A (set of the process availability states):
Set S_A of number codes assigned to the operation process model availability states, defined on the basis of set S of number codes assigned to the operation process model states ($S_A \in S = \{1, 2, \dots, m\}$).

In each moment of the simulation experiment in which the modeled operation process undergoes change (for the analyzed technical object) the following data is being entered into the file of results:

- number of the technical object NOT,
- number of the current event NZ,

Method of availability control in the transport system using simulation model...
Metoda sterowania gotowością w systemie transportowym z zastosowaniem modelu...

- time of the current event (current time of model T_M),
- number of the model current state NS ,
- current decision d ,
- value of unit profit c related to the object's being in the process current state,
- generated value of the object's being in a current state Θ .

Next, values of functions applied in the simulation program are determined for the set of data generated during the simulation experiment (for the used strategy δ):

- result defining the value of a mean unit profit $C(\delta)$

$$C(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^Z c_i \cdot \Theta_i}{\sum_{i=1}^Z \Theta_i}, \quad (3)$$

where:

c_i – i -th performance of a unit profit connected with being in the states of the modeled operation process $S = \{1, 2, \dots, m\}$,

Θ_i – i -th time of the object's being in the states of the modeled operation process $S = \{1, 2, \dots, m\}$,

$Z = LOT \cdot LZ$ – number of events (changes of the model states) for a specified number of technical objects;

- a result defining values of the technical object availability function $A(\delta)$

$$A(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^Z \Theta_i(S_A)}{\sum_{i=1}^Z \Theta_i}, \quad (4)$$

where:

$\Theta_i(S_A)$ – i -th time of the object's being in the modeled operation process states belonging to unavailability states $S_A \in S = \{1, 2, \dots, m\}$.

In figure 2 there is a block scheme depicting operation of the program for the model of technical objects operation process. Figure 2 has been completed with the following symbols:

- GenNSP - generation of the model initial state number,
- GenNS - generation of the model current state,
- Gen Θ - generation of the time value of being in the model state.

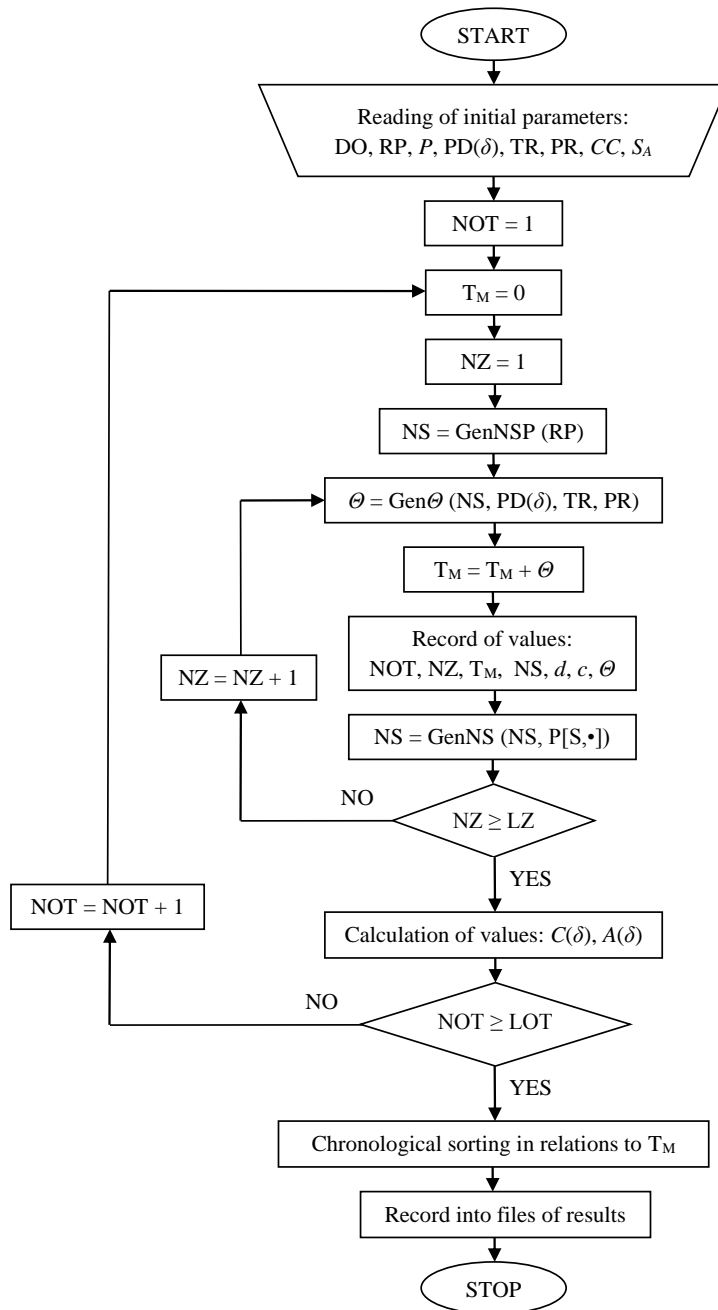


Fig. 2 Block scheme depicting operation of the program for technical objects operation process simulation model

4. Sample results of simulation tests for the operation and maintenance process model

Below, sample tests results for the operation process model obtained from input data processed after being provided from a real system of technical objects operation (for the model of operation process presented in figure 1) have been shown. The performed experiments involved 30 simulations of the operation process for each considered strategy δ .

Sets of 30 values of mean unit profit $C(\delta)$ and 30 values of the technical object availability $A(\delta)$ were obtained in result of simulation experiments. In figure 3 typical results of simulation experiments were presented for three selected strategies of technical object operation control process δ , so that the designated availability of technical objects $A(\delta)$ was at least equal to expected availability $A_r(\delta)$ for appropriate realization of transport tasks (for $A_r(\delta) = 0.83; 0.84; 0.85$).

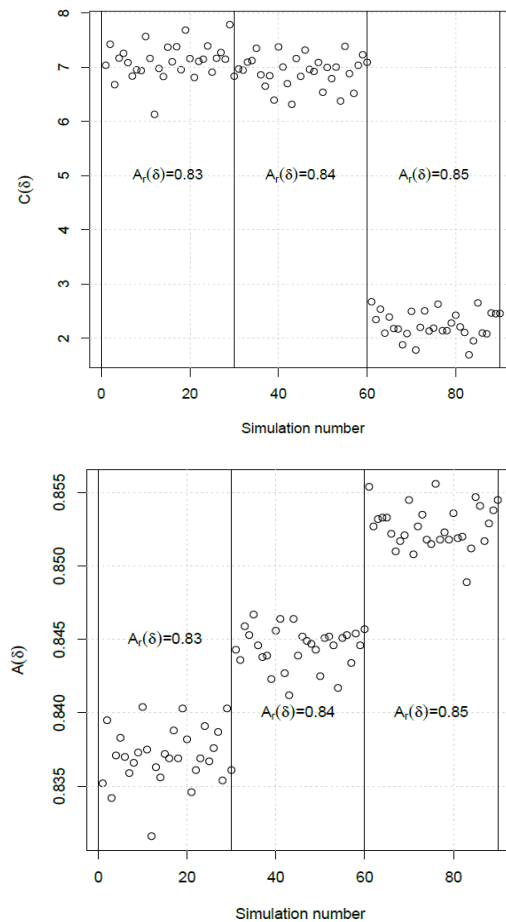


Fig. 3 Values of unit income as well as availability of technical object on the basis of simulation experiments

Table 1 and figure 4 shows mean values, values of standard deviation and values of positional statistics (minimum, 1 quartile, median, mean, 3 quartile, maximum), determined for the considered characteristics of the technical objects operation process quality and selected strategies δ .

Tab. 1 Values of statistics determined for mean unit profit and availability of a technical object

	δ for $A_r(\delta)=0.83$		δ for $A_r(\delta)=0.84$		δ for $A_r(\delta)=0.85$	
	$C(\delta)$ [PLN/h]	$A(\delta)$	$C(\delta)$ [PLN/h]	$A(\delta)$	$C(\delta)$ [PLN/h]	$A(\delta)$
Mean	7.1066	0.8371	6.9229	0.8445	2.2451	0.8527
Standard deviation	0.3209	0.0019	0.2930	0.0014	0.2505	0.0015
Minimum	6.1277	0.8316	6.3137	0.8412	1.6911	0.8489
1 Quartile	6.9392	0.8361	6.7984	0.8438	2.0955	0.8518
Median	7.1262	0.8370	6.9622	0.8447	2.1906	0.8525
3 Quartile	7.2661	0.8383	7.0920	0.8453	2.4534	0.8536
Maximum	7.7846	0.8404	7.3828	0.8467	2.6700	0.8556

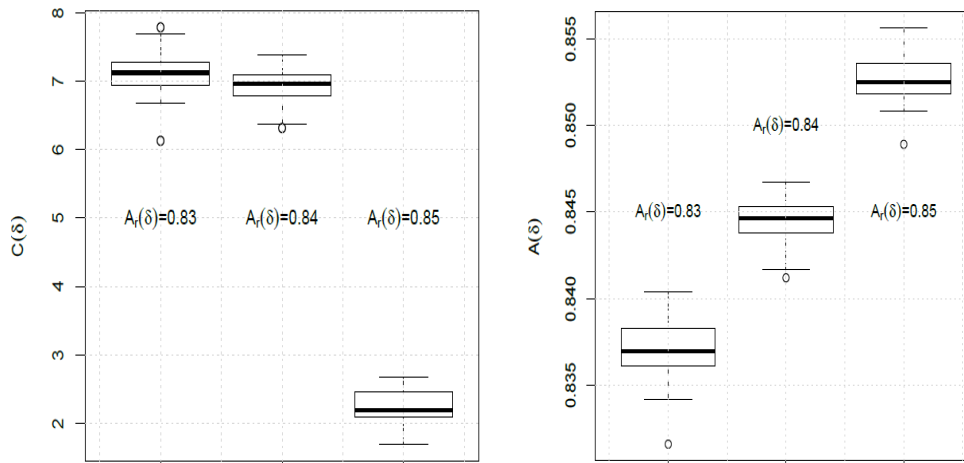


Fig. 4 Box-plot charts of value distribution for unit income as well as availability of the technical object for individual control strategies

5. Conclusions

One of the ways to facilitate effective evaluation and control of the quality of performance of complex technical object operation systems is implementing mathematical and simulation models for description and analysis of processes of operation carried out in these systems. Models of this type may be utilized for quality evaluation and control of complex technical systems performance from the point of view of various evaluation criteria such as: costs, income, reliability, availability, safety, efficiency, etc.

The simulation model of the operation process presented in the paper facilitates evaluation of the quality of the performance of analyzed technical system from the point of view of selected evaluation, i.e. mean income per time unit as well as technical object availability. On the basis of the obtained typical results it may be concluded that ensuring a higher level of availability of technical objects results in the necessity for additional expenses, at the same time resulting in decrease of unit income generated in operation system.

6. References

- [1] Grabski F.: Semi-Markov processes: Applications in system reliability and maintenance. Elsevier, Amsterdam, 2014.
- [2] Grabski F.: Risk analysis in decisive semi-Markov models of operation process. The 38th Winter Reliability School, Szczyrk, 2010, 43-52, (in Poland).
- [3] Knopik L., Migawa K., Wdzięczny A.: Profit optimalization in operation systems. Polish Maritime Research, vol. 23, no. 1(89), 2016, 93-98.
- [4] Kulkarni V. G.: Modeling and analysis of stochastic systems. Chapman & Hall, New York, 1995.
- [5] Lee K. W.: Stochastic models for random-request availability. IEEE Trans. Reliability 49, 2000, 80-84.
- [6] Marbach P., Tsitsiklis T. N.: Simulation based optimization of Markov reward process. IEEE Trans. Automat. Contr. 46, 2001, 191-209.
- [7] Migawa K., Knopik L., Neubauer A., Perczyński D.: Simulation of the model of technical object availability control. Engineering Mechanics, Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2017, 654-657.
- [8] Migawa K., Knopik L., Wawrzyniak S.: Application of genetic algorithm to control the availability of technical systems. Engineering Mechanics, Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2016, 386-389.
- [9] Muślewski Ł., Migawa K., Knopik L.: Control of technical objects operation quality with the use of simulation modeling PE. Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice: Proceedings of ESREL, 2016, 1388-1395.



Assoc. Prof. Klaudiusz Migawa, Ph.D. Eng., member of the Faculty of Mechanical Engineering of the UTP University of Science and Technology in Bydgoszcz. In his academic studies, he is preoccupied with the problems of evaluation and control of the level of efficiency, reliability, availability as well as safety of the complex systems of technical objects operation. He is the author of scientific papers in the field of modeling of systems and operation processes of means of transport with the implementation of stochastic processes (Share 40%).



Andrzej Neubauer, D.Sc., member of the Faculty of Economic Sciences and Management of the Nicolas Copernicus University in Toruń. His academic studies include the problems connected to the modeling and simulation of operation processes and process control on the basis of Markov and semi-Markov processes. Moreover, he is interested in the implementation of genetic and evolutionary as well as simulated annealing algorithms in simulation optimization of single and multi-criteria operation processes (Share 40%).



Assoc. Prof. Łukasz Muślewski, Ph.D. Eng., manager of the Department of Maintenance and Transport Operation at the Faculty of Mechanical Engineering of the UTP University of Science and Technology in Bydgoszcz. In his academic research he deals with the problems associated with operation quality of complex technical systems particularly transport systems. His research covers issues connected with reliability, safety, efficiency and environment friendliness of sociotechnical systems whose operation is affected by operators, technical objects operated by them and other environmental factors (Share 10%).



Bogdan Landowski, D.Sc., works in the Department of Transport and Machine Maintenance of the Faculty of Mechanical Engineering in the UTP University of Science and Technology in Bydgoszcz. His scientific work deals with the problems of complex maintenance systems effectiveness, as well as of modelling of maintenance processes and systems. The research area covers application of Markov decision process theory for mathematical modelling of maintenance processes. His scientific investigations are focused on numerical modelling of maintenance processes and systems (Share 10%).

METODA STEROWANIA GOTOWOŚCIĄ W SYSTEMIE TRANSPORTOWYM Z ZASTOSOWANIEM MODELU SYMULACJI PROCESU EKSPLOATACJI

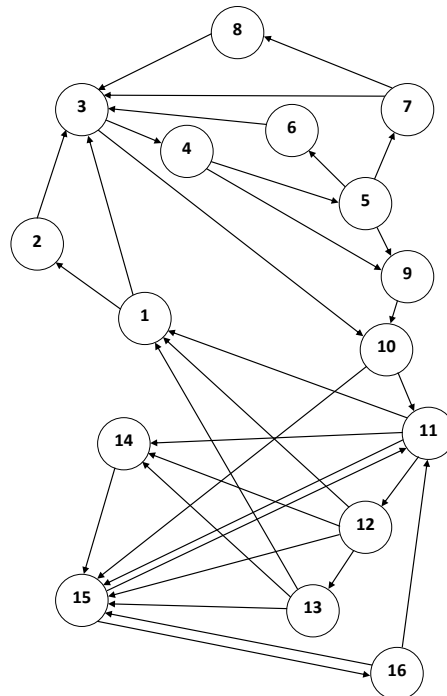
1. Wstęp

Problematyka sterowania procesem eksploatacji realizowanym w złożonych systemach technicznych ze względu na wybrane kryterium oceny przedstawiana jest w wielu pracach [1, 2, 3, 8]. W zależności od rodzaju rozpatrywanych problemów badawczych stosowane są odpowiednie modele matematyczne oraz metody wyznaczania rozwiązań optymalnych lub quasi-optymalnych. Ze względu na znaczną złożoność procesów realizowanych w rzeczywistych systemach eksploatacji obiektów technicznych zachodzi potrzeba stosowania odpowiednich metod i narzędzi, w tym modeli stochastycznych [1, 4, 5] oraz komputerowych programów symulacyjnych, zapewniających efektywną realizację badań modeli rozpatrywanych procesów eksploatacji oraz analizę otrzymanych wyników [6, 7, 9]. Jednym ze sposobów umożliwiających szczegółową i efektywną ocenę i sterowanie jakością działania złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych, takich jak: systemy eksploatacji maszyn roboczych, maszyn i urządzeń budowlanych, maszyn i środków transportowych, a także wszelkiego rodzaju urządzeń inżynierskich, jest zastosowanie modeli symulacyjnych do opisu i analizy procesów eksploatacji realizowanych w rozpatrywanych systemach technicznych. Modele te zapewniają możliwość oceny i sterowania jakością działania złożonych systemów technicznych z punktu widzenia wybranych kryteriów, takich jak koszty, dochody, niezawodność, gotowość, bezpieczeństwo, wydajność itd.

W pracy przedstawiono wyniki oceny jakości działania wybranego, rzeczywistego systemu eksploatacji obiektów technicznych, uzyskane na podstawie badań opracowanego symulacyjnego modelu procesu eksploatacji realizowanego w rozpatrywanym systemie. Zbudowany symulacyjny model procesu eksploatacji został opracowany na bazie modelu zdarzeniowego tego procesu. Zdarzeniowy model procesu eksploatacji został zbudowany na podstawie analizy przestrzeni stanów oraz zdarzeń eksploatacyjnych dotyczących obiektów technicznych (środków transportu) eksploatowanych w analizowanym rzeczywistym systemie.

2. Zdarzeniowy model procesu eksploatacji środków transportu

W pracy przedstawiono zdarzeniowy model analizowanego procesu eksploatacji środków transportu. W wyniku identyfikacji badanego procesu eksploatacji środków transportu, wyznaczono istotne stany eksploatacyjne tego procesu oraz możliwe przejścia między wyróżnionymi stanami. Na tej podstawie zbudowano graf zmian stanów procesu eksploatacji, przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1 Graf skierowany odwzorowania procesu eksploatacji środków transportu

1 – postój na placu postojowym, 2 – naprawa na placu postojowym, 3 – realizacja zadania, 4 – przerwa w realizacji zadania spowodowana uszkodzeniem, 5 – diagnozowanie przez pogotowie techniczne, 6 – naprawa przez pogotowie techniczne bez utraty kursu, 7 – naprawa przez pogotowie techniczne z utratą kursu, 8 – oczekiwanie na realizację zadania po naprawie przez pogotowie techniczne, 9 – zjazd awaryjny, 10 – oczekiwanie na wjazd na stanowiska podsystemu utrzymania ruchu, 11 – uzupełnianie paliwa, 12 – realizacja obsługi w dniu użytkowania, 13 – realizacja okresowej obsługi technicznej, 14 – diagnozowanie przed naprawą w podsystemie utrzymania ruchu, 15 – naprawa w podsystemie utrzymania ruchu, 16 – diagnozowanie po naprawie w podsystemie utrzymania ruchu

3. Program symulacji modelu procesu eksploatacji

Ze względu na znaczną złożoność modelowanych procesów eksploatacji, realizowanych w rzeczywistych systemach eksploatacji obiektów technicznych zachodzi potrzeba stosowania odpowiednich metod i narzędzi, w tym komputerowych programów symulacyjnych, zapewniających efektywną realizację badań modeli rozpatrywanych procesów eksploatacji oraz analizę otrzymanych wyników.

W celu zapewnienia możliwości rozpatrywania różnych wariantów obliczeniowych, np. przez zmianę wartości parametrów modelowanego procesu lub liczby rozpatrywanych obiektów technicznych, opracowano program symulacji modelu procesu eksploatacji obiektów technicznych. Program symulacji modelu procesu eksploatacji został napisany w: R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

Opracowany program symulacji procesu eksploatacji umożliwia wykonywanie eksperymentów symulacyjnych dla różnych liczb zdarzeń eksploatacyjnych (zmian stanów procesu), przedziałów czasu symulacji, zarówno w przypadku pojedynczego obiektu technicznego, jak i grupy obiektów technicznych. W programie symulacyjnym kolejne realizacje czasów trwania stanów modelu procesu eksploatacji, wyznaczane są z zastosowaniem algorytmów generowania liczb pseudolosowych, generujących wartości z rozkładów wykładniczego, gamma, normalnego, logarytmiczno-normalnego i Weibulla. Struktura programu symulacyjnego została opracowana tak, aby eksperyment symulacyjny odwzorowywał w trakcie realizacji zbiór analizowanych obiektów technicznych oraz realizujące się w badanym rzeczywistym systemie następstwo zdarzeń, dotyczące poszczególnych obiektów technicznych.

W celu realizacji eksperymentu symulacyjnego, konieczne jest przygotowanie zbioru określonych danych wejściowych:

a) DO (dane ogólne charakteryzujące eksperyment symulacyjny):

LOT – liczba obiektów technicznych w eksperymencie symulacyjnym,

LZ – liczba zdarzeń dla obiektu technicznego w eksperymencie symulacyjnym,

m – liczba stanów procesu, określona na podstawie zbioru stanów modelowanego procesu eksploatacji $S = \{1, 2, \dots, m\}$,

LD – liczba decyzji możliwych do zastosowania w poszczególnych stanach modelowanego procesu eksploatacji,

L δ – liczba strategii δ możliwych do zastosowania w eksperymencie symulacyjnym;

Jako strategię δ rozumie się ciąg, którego wyrazami są wektory, złożone z decyzji $d_i^{(k)}(t_n)$ podejmowanych w poszczególnych stanach procesu $X(t)$, w kolejnych chwilach t_n zmian tych stanów

$$\delta = \left\{ \left[d_1^{(k)}(t_n), d_2^{(k)}(t_n), \dots, d_m^{(k)}(t_n) \right] : n = 0, 1, 2, \dots \right\}. \quad (1)$$

W przypadku, gdy decyzje podejmowane w kolejnych stanach procesu nie zależą od chwili t_n , w której są podejmowane, czyli $d_i^{(k)}(t_n) = d_i^{(k)}$, to strategię δ nazywamy strategią stacjonarną. Wówczas wzór (1) przyjmuje postać

$$\delta = \left[d_1^{(k)}, d_2^{(k)}, \dots, d_m^{(k)} \right]. \quad (2)$$

- b) RP (rozkład początkowy procesu):
wektor stochastyczny o liczbie składowych równych liczbie stanów modelowanego procesu eksploatacji, określający rozkład prawdopodobieństwa przebywania w stanach modelowanego procesu eksploatacji na początku eksperymentu symulacyjnego;
- c) P (macierz prawdopodobieństw zmian stanów procesu):
macierz kwadratowa stopnia równego liczbie stanów modelowanego procesu eksploatacji, w której każdy wiersz jest wektorem stochastycznym określającym rozkład prawdopodobieństwa zmian stanów procesu, pod warunkiem, że aktualny stan procesu określony jest numerem tego wiersza;
- d) PD (macierz prawdopodobieństw wyboru decyzji w stanach procesu):
macierz prostokątna o liczbie wierszy równej liczbie stanów modelowanego procesu eksploatacji oraz liczbie kolumn równej liczbie decyzji możliwych do podjęcia w każdym ze stanów modelowanego procesu, złożona z wierszy stochastycznych określających rozkłady prawdopodobieństwa wyboru określonej decyzji w chwili wejścia obiektu technicznego do danego stanu modelowanego procesu. W przypadku zastosowania strategii deterministycznej δ , wartości elementów macierzy PD(δ) wyznaczają wektor stacjonarny, którego składowymi są kody liczbowe określające decyzje deterministyczne stosowane w poszczególnych stanach modelowanego procesu eksploatacji;
- e) TR, PR (typy i parametry rozkładów czasów pozostawania w stanach procesu):
opracowany program zawiera funkcje generujące wartości z rozkładów wykładniczego, gamma, normalnego, logarytmiczno-normalnego i Weibulla o zadanych parametrach;
- f) CC (macierz dochodów jednostkowych w stanach procesu):
macierz prostokątna o liczbie wierszy równej liczbie stanów modelowanego procesu eksploatacji oraz liczbie kolumn równej liczbie decyzji możliwych do podjęcia w każdym ze stanów modelowanego procesu, w której dla każdego stanu procesu i każdej decyzji możliwej do podjęcia w danym stanie (na skrzyżowaniu wiersza i kolumny), określona jest wartość dochodu jednostkowego (na jednostkę czasu), generowana, gdy obiekt techniczny przebywa w danym stanie (wyznaczonym numerem wiersza), przy podjęciu decyzji (wyznaczonej numerem kolumny);
- g) S_G (zbiór stanów gotowości procesu):
zbiór S_G kodów liczbowych przypisanych stanom gotowości modelu procesu eksploatacji, określony na podstawie zbioru S kodów liczbowych przypisanych stanom modelu procesu eksploatacji ($S_G \in S = \{1, 2, \dots, m\}$).

W trakcie realizacji eksperymentu symulacyjnego, w każdej chwili, w której następuje zmiana stanu modelowanego procesu eksploatacji (dla rozpatrywanego obiektu technicznego), do pliku wyników zapisywane są następujące dane:

- numer obiektu technicznego NOT,
- numer aktualnego zdarzenia NZ,
- chwila aktualnego zdarzenia (aktualny czas modelu T_M),
- numer aktualnego stanu modelu NS,
- aktualna decyzja d,
- wartość dochodu jednostkowego c dotycząca pozostawiania obiektu technicznego w aktualnym stanie,
- wygenerowana wartość czasu pozostawiania w aktualnym stanie Θ .

Następnie dla wygenerowanego, w trakcie realizacji eksperymentu symulacyjnego, zestawu danych, wyznaczane są wartości funkcji zastosowanych w programie symulacyjnym (dla zastosowanej strategii δ):

- wynik określający wartość średniego jednostkowego dochodu $C(\delta)$

$$C(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^Z c_i \cdot \Theta_i}{\sum_{i=1}^Z \Theta_i}, \quad (3)$$

gdzie:

- c_i – i-ta realizacja dochodu jednostkowego dotycząca pozostawiania w stanach modelowanego procesu eksploatacji $S = \{1, 2, \dots, m\}$,
- Θ_i – i-ta realizacja czasu pozostawiania w stanach modelowanego procesu eksploatacji $S = \{1, 2, \dots, m\}$,
- $Z = LOT \cdot LZ$ – liczba zdarzeń (zmian stanów modelu), dla określonej liczby obiektów technicznych;

- wynik określający wartość funkcji gotowości obiektu technicznego $G(\delta)$

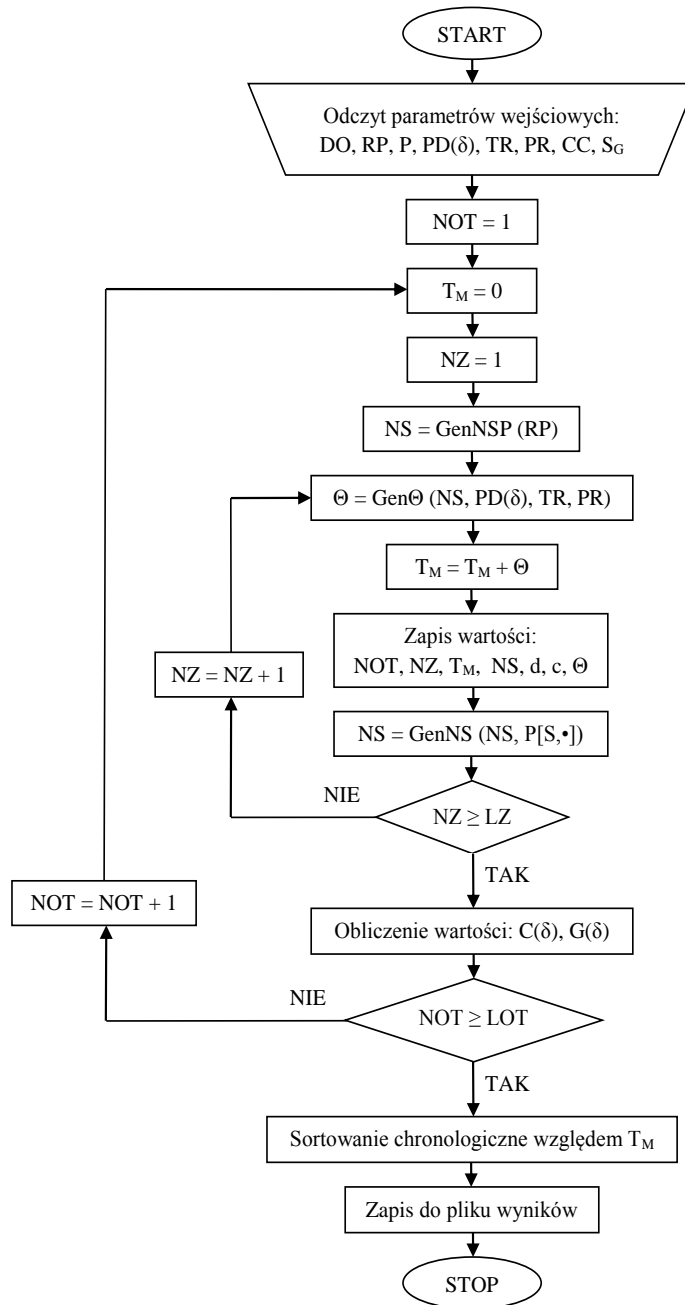
$$G(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^Z \Theta_i(S_G)}{\sum_{i=1}^Z \Theta_i}, \quad (4)$$

gdzie

- $\Theta_i(S_G)$ – i-ta realizacja czasu pozostawiania w stanach modelowanego procesu eksploatacji, należących do stanów gotowości $S_G \in S = \{1, 2, \dots, m\}$.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy działania programu symulacji modelu procesu eksploatacji obiektów technicznych. Dodatkowo na rysunku 2 użyto następujących oznaczeń:

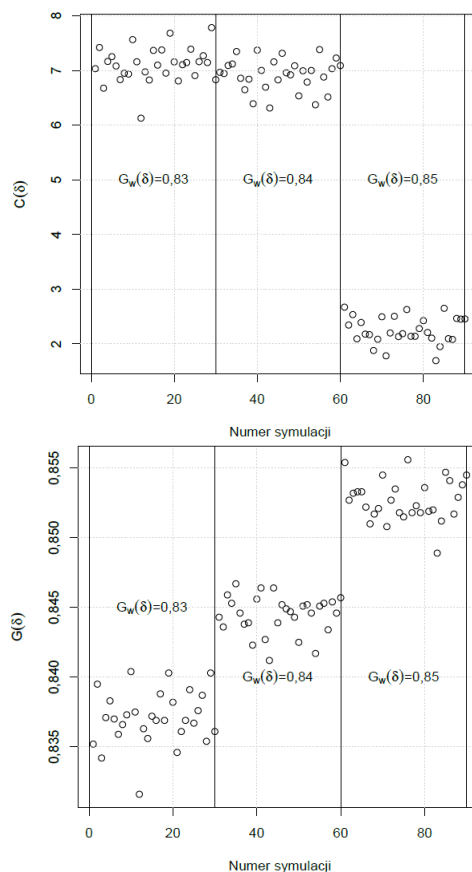
- GenNSP – generowanie numeru stanu początkowego modelu,
- GenNS – generowanie numeru aktualnego stanu modelu,
- Gen Θ – generowanie wartości czasu przebywania w aktualnym stanie modelu.



Rys. 2. Schemat blokowy działania programu symulacji modelu procesu eksploatacji obiektów technicznych

4. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych modelu procesu eksploatacji

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań modelu symulacyjnego procesu eksploatacji uzyskane dla danych wejściowych opracowanych z badań rzeczywistego systemu eksploatacji obiektów technicznych (dla modelu procesu eksploatacji przedstawionego na rysunku 1). Zrealizowane eksperymenty polegały na 30-krotnej symulacji procesu eksploatacji dla każdej rozpatrywanej strategii δ . W wyniku realizacji eksperymentów symulacyjnych, uzyskano zbiory 30 wartości średniego dochodu jednostkowego $C(\delta)$ oraz 30 wartości gotowości obiektu technicznego $G(\delta)$. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki eksperymentów symulacyjnych dla wybranych trzech strategii sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych δ , w taki sposób, aby wyznaczona gotowość obiektów technicznych $G(\delta)$ była co najmniej równa gotowości wymaganej $G_w(\delta)$ do prawidłowej realizacji zadań przewozowych (dla $G_w(\delta) = 0,83; 0,84; 0,85$).

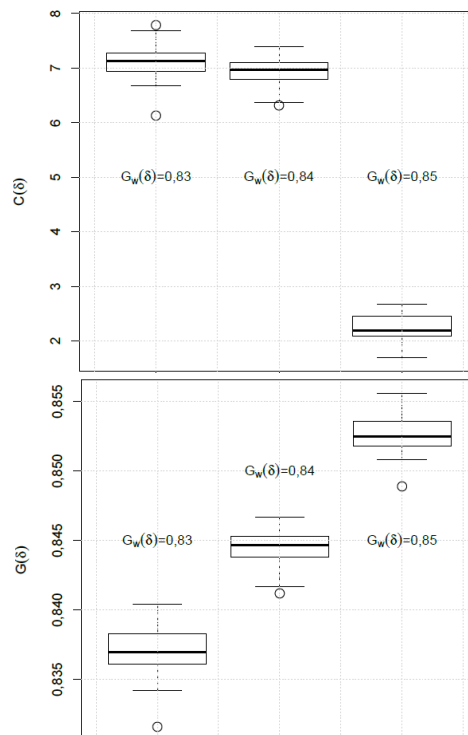


Rys. 3 Wartości dochodu jednostkowego oraz gotowości obiektu technicznego, wyznaczone na podstawie eksperymentów symulacyjnych

W tabelicy 1 oraz na rysunku 4 przedstawiono wartości średnie, wartości odchylenia standardowego oraz wartości statystyk pozycyjnych (minimum, 1 kwartył, mediana, średnia, 3 kwartył, maksimum), wyznaczone dla rozpatrywanych charakterystyk oceny jakości działania obiektów technicznych i wybranych strategii δ .

Tab. 1 Wartości statystyk wyznaczone dla średnich dochodów jednostkowych i gotowości obiektu technicznego

	δ dla $G_w(\delta)=0,83$		δ dla $G_w(\delta)=0,84$		δ dla $G_w(\delta)=0,85$	
	$C(\delta)$ [PLN/h]	$G(\delta)$	$C(\delta)$ [PLN/h]	$G(\delta)$	$C(\delta)$ [PLN/h]	$G(\delta)$
Średnia	7,1066	0,8371	6,9229	0,8445	2,2451	0,8527
Odchylenie standardowe	0,3209	0,0019	0,2930	0,0014	0,2505	0,0015
Minimum	6,1277	0,8316	6,3137	0,8412	1,6911	0,8489
1 kwartył	6,9392	0,8361	6,7984	0,8438	2,0955	0,8518
Mediana	7,1262	0,8370	6,9622	0,8447	2,1906	0,8525
3 kwartył	7,2661	0,8383	7,0920	0,8453	2,4534	0,8536
Maksimum	7,7846	0,8404	7,3828	0,8467	2,6700	0,8556



Rys. 4 Wykresy pudełkowe (box-plot) rozkładu wartości dochodu jednostkowego oraz gotowości obiektu technicznego dla poszczególnych strategii sterowania

5. Podsumowanie

Jednym ze sposobów umożliwiających efektywną ocenę i sterowanie jakością działania złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych jest zastosowanie modeli matematycznych i symulacyjnych do opisu i analizy procesów eksploatacji realizowanych w tych systemach. Modele tego typu mogą być zastosowane do oceny i sterowania jakością działania złożonych systemów technicznych z punktu widzenia różnych kryteriów oceny, takich jak: koszty, dochody, niezawodność, gotowość, bezpieczeństwo, wydajność itd.

Przedstawiony w pracy symulacyjny model procesu eksploatacji umożliwia ocenę jakości działania rozpatrywanego systemu technicznego z punktu widzenia wybranych kryteriów oceny, to znaczy średnich dochodów na jednostkę czasu oraz gotowości obiektów technicznych. Na podstawie otrzymanych przykładowych wyników można stwierdzić, że zapewnienie wyższego poziomu gotowości obiektów technicznych powoduje konieczność poniesienia dodatkowych kosztów, a tym samym zmniejszenia dochodu jednostkowego generowanego w systemie eksploatacji.

6. Literatura

- [1] Grabski F.: *Semi-Markov processes: Applications in system reliability and maintenance*. Elsevier, Amsterdam, 2014.
- [2] Grabski F.: *Analiza ryzyka w decyzyjnych semi-markowskich modelach procesu eksploatacji*. XXXVIII Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 2010, 43-52.
- [3] Knopik L., Migawa K., Wdzięczny A.: *Profit optimization in operation systems*. Polish Maritime Research, vol. 23, no. 1(89), 2016, 93-98.
- [4] Kulkarni V. G.: *Modeling and analysis of stochastic systems*. Chapman & Hall, New York, 1995.
- [5] Lee K. W.: *Stochastic models for random-request availability*. IEEE Trans. Reliability 49, 2000, 80-84.
- [6] Marbach P., Tsitsiklis T. N.: *Simulation based optimization of Markov reward process*. IEEE Trans. Automat. Contr. 46, 2001, 191-209.
- [7] Migawa K., Knopik L., Neubauer A., Perczyński D.: *Simulation of the model of technical object availability control*. Engineering Mechanics, Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2017, 654-657.
- [8] Migawa K., Knopik L., Wawrzyniak S.: *Application of genetic algorithm to control the availability of technical systems*. Engineering Mechanics, Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2016, 386-389.
- [9] Muślewski Ł., Migawa K., Knopik L.: *Control of technical objects operation quality with the use of simulation modeling PE. Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice: Proceedings of ESREL, 2016, 1388-1395.*



Dr hab. inż. Klaudiusz Migawa, prof. nadzw. UTP, pracownik Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. W pracy naukowej zajmuje się problematyką oceny i sterowania poziomem efektywności, niezawodności, gotowości oraz bezpieczeństwa złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych. Autor prac naukowych z zakresu modelowania systemów i procesów eksploatacji środków transportu (Udział 40%).



Dr Andrzej Neubauer, pracownik Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. W pracy naukowej zajmuje się problemami dotyczącymi modelowania i symulacji procesów eksploatacji, sterowania procesami w oparciu o procesy Markowa i semi-Markowa. Interesuje się też zastosowaniem algorytmów genetycznych, ewolucyjnych i symulowanego wyżarzania do symulacyjnej optymalizacji procesów sterowania (Udział 40%).



Prof. nadzw. dr hab. inż. Łukasz Muślewski, kierownik Zakładu Eksploatacji i Transportu na Wydziale Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami jakości działania złożonych systemów eksploatacji a w szczególności systemów transportowych. Realizuje badania z zakresu niezawodności, bezpieczeństwa, efektywności i ekologiczności systemów socjotechnicznych, w których na jakość ich działania mają wpływ operatorzy, sterowane przez nich obiekty techniczne oraz czynniki oddziałujących z otoczenia (Udział 10%).



Dr inż. Bogdan Landowski, pracuje w Zakładzie Transportu i Eksploatacji na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. W pracy naukowej zajmuje się problemami dotyczącymi efektywności złożonych systemów eksploatacji oraz modelowania procesów i systemów eksploatacji. Tematyka badawcza obejmuje zastosowanie teorii decyzyjnych procesów Markowa do matematycznego modelowania procesów eksploatacji. Prowadzi badania w zakresie modelowania numerycznego procesów i systemów eksploatacji (Udział 10%).

Method of availability control in the transport system using simulation model...
Metoda sterowania gotowością w systemie transportowym z zastosowaniem modelu...