

NIEOCZYM Aleksander, KRZYWONOS Leszek

METODYKA OBLICZEŃ NIEZAWODNOŚCI DZIAŁANIA WSPÓŁPRACUJĄCYCH URZĄDZEŃ

Streszczenie

Ogólnie znane modele matematyczne funkcjonowania systemów produkcyjnych bazują na równaniach wykładniczych opisu stanów pracy. Jednak modele te testowane na rzeczywistych systemach dają wyniki rozbieżne, w szczególności przy założeniu indywidualnych wartości strumieni uszkodzeń i napraw współpracujących urządzeń. Bazując na ogólnie przyjętej metodyce, dokonano dekompozycji systemu produkcyjnego na elementarne moduły a następnie przeprowadzono analizę powiązań funkcjonalnych pomiędzy nimi. Zastosowano aparat matematyczny oparty na rozkładzie Erlanga w celu opisu prawdopodobieństwo przebywania w każdym ze stanów pracy oraz funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Przedstawiono opis matematyczny stanów pracy i wynikających z nich kryteriów niezawodności oddziaływań.

1. MODEL MATEMATYCZNY PROCESÓW NA LINII PRODUKCYJNEJ

W celu uproszczenia analiz matematycznych zachodzących na linii produkcyjnych dokonuje się opisu zdarzeń w jej elementarnych częściach tj. modułach technologicznych. Moduł technologiczny jest podstawową jednostką strukturalną linii produkcyjnej, zawiera podsystem operacji technologicznych, wewnątrzoperacyjnego transportu, gromadzenia i załadunku. Uzyskane wyniki są uogólniane i aproksymowane na kolejne podsystemy znajdujące się na wyższej płaszczyźnie hierarchicznych powiązań i w ten sposób formułowane są wnioski odnośnie funkcjonowania całej linii. Zagadnienie poprawy niezawodności urządzeń może być rozwiązywane na bazie podwyższenia niezawodności modułów wchodzących w skład systemu lub poprzez czasowe rezerwowanie. Często w celu uzyskania rezerwowania czasowego w linii pomiędzy oddzielnymi komórkami montażowymi umieszcza się podajniki (zasobniki) pośredniej produkcji [5, 6, 10, 12]. Problemy badawcze nakierowane na opis modeli linii z uwzględnieniem wykorzystywanego w nich czasowego rezerwowania zostały przedstawione w [1, 10]. Przyjmuje się dwie metody budowy modeli. Pierwsza oparta na wykorzystywaniu teorii procesów Markowa pozwalająca otrzymać analityczne wyrażenia, kolejna to metoda wykorzystująca procesy iteracyjne pozwalająca obliczyć średnią liczbę części w zasobnikach.

Niezawodność systemów produkcyjnych często jest opisywana za pomocą procesów Markowa z uwzględnieniem stanów: pracy, odnowy i postoju. Ich rozwinięciem są kolejne modele, w którym czas awarii zostaje włączony do rzeczywistego zasobu czasu pracy z zastosowaniem ekwiwalentnego przekształcenia urządzenia zawodnego w urządzenie absolutnie niezawodne.

Budowę niezawodnych modeli w [1-7] przeprowadzono przy założeniach:

- 1 – Uszkodzenia wszystkich elementów systemu są niezależne: czas do pierwszego uszkodzenia określony jest według zależności wykładniczych z parametrem λ .
- 2 – W wyniku uszkodzeniu elementu systemu od razu zaczyna się jego przywracanie do pracy (naprawa) w przeciągu czasu określono według wykładniczych zależności z parametrem μ .

Uszkodzenie urządzeń pomocniczych (peryferyjnych) w elementarnej części powoduje przestoje urządzeń technologicznych. Współczynniki niezawodności dodatkowego oprzyrządowania powinny być odpowiednio wyższe od analogicznych współczynników urządzeń technologicznych. Jednak, jak wynika z praktyki, mają one zbliżone wartości. W celu osiągnięcia niezawodności funkcjonowania systemów montażowych równej 94 % należałoby zastosować elementy o niezawodności nie mniejszej niż 99,9%. Przykładowo, czas pracy do pierwszego uszkodzenia wynosi np. dla robota „Fanus” – 14000 godzin, General Electric 61 – 13000 godzin. Czas pracy pojazdów AGV do chwili uszkodzenia przewyższa współczynnik bezawaryjnej pracy podstawowych technologicznych urządzeń około 3 krotnie, transportowo – składujących systemów około 2,6 krotnie, systemów centralnego sterowania – 3,2 [10].

W [6, 8] opisano zdarzenia na linii, kiedy strumienie uszkodzeń i napraw rozdzielono na zależne od urządzeń w module technologicznym oraz od zasobników i urządzeń transportowych. Bezawaryjność pracy systemu w ciągu zadanego czasu założono z zadanym prawdopodobieństwem. Podstawowa idea rozwiązywanych powyżej zagadnień zawiera się we wprowadzeniu hipotez o losowym występowaniu uszkodzeń elementów w rozpatrywanym przedziale czasu. Przedstawione zostały podstawowe równania dedykowane ocenie niezawodności modułów oraz szczegółowe równania dla najczęściej spotykanych konfiguracji systemu. Analizy te poparte są obliczeniami prostej struktury zawierającej jeden moduł i jeden zasobnik o ograniczonej pojemności, przy zastosowaniu wykładniczego rozkładu czasu pracy do uszkodzenia i normalnego rozkładu czasu przywrócenia. Podczas procesu przywracaniu do pracy (naprawy) uszkodzonych elementów systemu największy priorytet posiadają elementy z najwyższym numerem porządkowym (położone bliżej końca linii). System jest uszkodzony, jeżeli na jego wyjściu nie pojawiają się zmontowane zespoły w czasie zadanego czasu.

Podsumowując, należy stwierdzić, że analiza powiązań w systemach produkcyjnych bazuje na teorii niezawodności i teorii obsługi masowej. W wielu przypadkach teorie te nie mogą być bezpośrednio wykorzystane do modelowania i optymalizacji parametrów linii ze względu na to, że:

- 1- Do rozwiązania zadań parametrycznej optymalizacji, powstających podczas projektowania i eksploatacji, potrzebne są modele matematyczne pozwalające ocenić nie tylko niezawodność i wydajność linii, a także i wielkość wewnątrzprodukcyjnych zapasów; dotychczasowe modele nie dają odpowiedzi na pytania o zapasy produkcji w podajnikach.
- 2- Szereg modeli linii i ich elementarnych części, które były budowane z zastosowaniem uproszczeń służących powszechności zastosowania nie obejmowało wpływu następstw przy jednoczesnym funkcjonowaniu modułu i zasobnika (bufora, przenośnika części).
- 3- Szereg modeli opiera się na zastosowaniu praw rozkładu wykładniczego. W licznych publikacjach udowodniono, że zastosowanie praw wykładniczych opisujących funkcjonowanie rzeczywistych systemów z awariami umożliwia uzyskanie małej dokładności. Dodatkowo należy stwierdzić, że w ostatnich latach otrzymano teoretyczne i eksperymentalne dowody niewykładniczego charakteru procesów uszkodzeń i napraw (powrotu do stanu działania) w złożonych systemach technicznych, jednak ten fakt nie znalazł jak na razie żadnego odbicia w modelach matematycznych.

Analiza funkcjonowania współpracujących urządzeń powinna umożliwić przeprowadzenie następujących czynności:

1-dla urządzenia o danych parametrach, dokonać analizy jego pracy pod względem niezawodności i funkcjonalności.

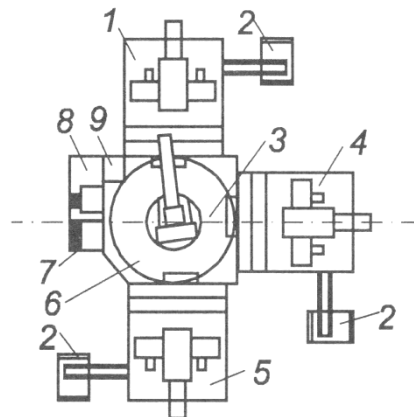
2-zidentyfikować urządzenia, które swoimi parametrami zaburzają tok pracy.

3-określić pojemność zasobników buforowych, w taki sposób aby zminimalizować wpływ uszkodzeń na funkcjonowanie współpracujących komórek.

W poniższym artykule przedstawiono model matematyczny współpracy pomiędzy zasobnikiem a urządzeniem transportującym części. Opisano stany ich pracy wykorzystując rozkład Erlanga, dzięki czemu wyeliminowano wady dotychczasowych modeli przy zachowaniu ogólnej metodologii budowy modeli linii. Przedstawione równania posiadają oznaczenia i pojęcia adekwatne do powszechnie stosowanych w literaturze.

2. MODEL MATEMATYCZNY ODDZIAŁYWANIA POMIĘDZY ZASOBNIKIEM A URZĄDZENIEM ZAŁADOWCZYM

W zależności od rodzaju organu transportowo – załadowniczego, moduły technologiczne zorganizowane są na bazie: stołu obrotowego, transportera liniowego, robota do manipulacji przedmiotami, robota o połączonych funkcjach technologicznych i załadunkowych [9, 10, 13]. Modele matematyczne funkcjonowania linii produkcyjnych są modelami uogólnionymi, nie odnoszą się do konkretnego typu linii. Każdy z nich opisuje proces pomiędzy elementarnymi współpracującymi urządzeniami, np. pomiędzy urządzeniem technologicznym a załadowniczym, współdziałanie pomiędzy manipulatorem a zasobnikiem lub współpracę pomiędzy mobilnym urządzeniem transportowym a modułami technologicznymi [10].



Rys.1. System produkcyjny z manipulatorem załadownym 1,4,5 – obrabiarki wielofunkcyjne, 2- magazyny narzędziowe, 3-manipulator, 6- myjka, 7- zasobnik, 8- urządzenie załadunkowo – rozładunkowe, 9- zasobnik kasetowy.

Źródło: [13]

Na rys. 1. przedstawiono schemat przykładowego modułu technologicznego, w którym do załadunku i transportu międzyoperacyjnego wykorzystywane są manipulatory. W takim gnieździe trzy obrabiarki wielofunkcyjne 1,4, 5 są połączone przez robot 3. W urządzeniu załadunkowo – rozładunkowym na paletach umieszczane są przedmioty z zasobnika 7, po czym robot przemieszcza je na poszczególne pozycje obróbkowe. Po obróbce i czynnościach wykańczających, palety są automatycznie załadowywane przy pomocy urządzenia załadowniczego – rozładunkowego 8. Obrobione przedmioty są składowane w kasetowym zasobniku 9.

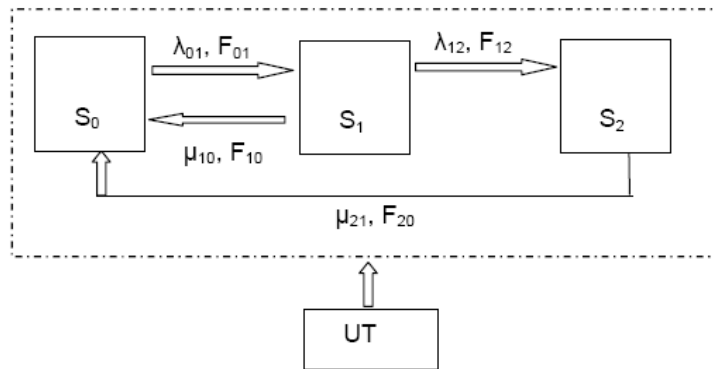
Model matematyczny stworzono przyjmując następujące założenia wstępne:

1-Moduły technologiczne powiązane są szeregowo. Moduł KM_1 wytwarza elementy, które przemieszczane są do zasobnika H_k . Elementy te transportowane są do kolejnego modułu KM_2

2-Czas τ_p napełnienia zasobnika H_k , przy niepracującym module KM_2 , określony jest różnicą liczby części w zasobniku m_k i średniostatystycznego zapasu produkcji L_k . Ponadto zakłada się, że czas napełnienia jest większy od czasu opróżnienia zasobnika $\tau_B < \tau_p$

3-Procesy zachodzące podczas pracy powiązanych elementów: moduł – zasobnik -urządzenie transportowe, są procesami Markowa.

Stany działania takiego układu graficznie zostały przedstawione na rys. 2, a opisano ich w tabeli 1.



Rys. 2. Schemat zależności pomiędzy zasobnikiem a urządzeniem załadowniczym UT

Źródło: badania własne

Tab.1. Identyfikacja stanów działania

Stan	Urządzenie załadownicze	Zasobnik
S_0	sprawne	sprawne
S_1	niesprawne	wydaje części
S_2	niesprawne	zablokowane

Źródło: badania własne

Zdarzenie $S_1 \rightarrow S_2$ następuje w wyniku zablokowania zasobnika przy niesprawnym UT. Części nie są transportowane do modułu KM_2 , zablokowanie następuje po upływie czasu τ_H (zależnego od konstrukcji zasobnika).

Przyjmuje się tu, że funkcja rozkładu $F_{12}(t)$ ma postać:

$$F_{12}(t) = 1(t - \tau_H) \quad (1)$$

Gdzie: τ_H – stała czasowa rezerw zasobnika.

Funkcja rozkładu F_{01} odpowiadająca zdarzeniu $S_0 \rightarrow S_1$ ma postać:

$$F_{01} = \begin{cases} \frac{\lambda_2^{0,1} [1 - e^{-\lambda_1^{0,1}(t-\tau)}] - \lambda_1^{0,1} [1 - e^{-\lambda_2^{0,1}(t-\tau)}]}{\lambda_2^{0,1} - \lambda_1^{0,1}}, & t > \tau \\ 0 & t < \tau \end{cases} \quad (2)$$

Gdzie: λ – intensywność uszkodzeń,

τ – stała czasowa zasobnika zależna od jego konstrukcji.

Przywrócenie pracy ze stanu $S_1 \rightarrow S_0$:

$$F_{10}(t) = \begin{cases} \frac{\mu_2^{1,0}[1 - e^{-\mu_1^{1,0}(t-\tau_B)}] - \mu_1^{1,0}[1 - e^{-\mu_2^{1,0}(t-\tau_B)}]}{\mu_2^{1,0} - \mu_1^{1,0}}, & \tau_B \leq t < \tau_H \\ 0, & t < \tau_B, \tau_B < \tau_H \\ 1, & t \geq \tau_H, \tau_B < \tau_H \\ 0, & t < \tau_H, \tau_H \leq \tau_B \\ 1, & t \geq \tau_H, \tau_H \leq \tau_B \end{cases} \quad (3)$$

Gdzie: τ_B – czas opróżnienia zasobnika,
 τ_H – stała czasowa rezerw zasobnika,
 μ – intensywność napraw.

Przejście ze stanu $S_2 \rightarrow S_0$:

$$F_{20}(t) = \begin{cases} \frac{\mu_2^{2,0}[1 - e^{-\mu_1^{2,0}(t-\tau_B+\tau_H)}] - \mu_1^{2,0}[1 - e^{-\mu_2^{2,0}(t-\tau_B+\tau_H)}]}{\mu_2^{2,0} - \mu_1^{2,0}}, & \text{dla } \tau_H \geq \tau_B \\ 0, & t < \tau_B - \tau_H, \tau_H \leq \tau_B \\ \frac{\mu_2^{2,0}(1 - e^{-\mu_1^{2,0}(t-\tau_B+\tau_H)}) - \mu_1^{2,0}(1 - e^{-\mu_2^{2,0}(t-\tau_B+\tau_H)})}{\mu_2^{2,0} - \mu_1^{2,0}}, & \text{dla } t \geq \tau_B - \tau_H, \tau_H < \tau_B \end{cases} \quad (4)$$

Gdzie: τ_p - czas napełnienia zasobnika.

Prawdopodobieństwo przejść pomiędzy stanami pracy określają równania:

$$P_{10} = \begin{cases} \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} [\mu_2(1 - e^{-\mu_1(\tau_H - \tau_B)}) - \mu_1(1 - e^{-\mu_2(\tau_H - \tau_B)})], & \tau_H \geq \tau_B \\ 0, & \tau_H < \tau_B \end{cases}$$

$$P_{01} = 1$$

$$P_{12} = 1 - P_{10} = \begin{cases} \frac{\mu_2 e^{-\mu_1(\tau_H - \tau_B)} - \mu_1 e^{-\mu_2(\tau_H - \tau_B)}}{\mu_2 - \mu_1}, & \tau_H \geq \tau_B \\ 1, & \tau_H < \tau_B \end{cases}$$

$$P_{20} = 1$$
(5)

Średni czas $\overline{t_{\xi_i}}$ przebywania układu w stanach S_i $i=(0, 1, 2)$ określamy jako matematyczną wartość oczekiwaną losowych wartości.

Wartość oczekiwana czasu przebywania komórki w stanie gotowości do pracy M_0^{KM} jest równa średniemu czasowi przebywania w stanie S_0 - $\overline{t_{\xi_0}}$:

$$M_0^{KM} [t] = \overline{t_{\xi_0}} = \frac{\lambda_1^{0,1} + \lambda_2^{0,1}}{\lambda_2^{0,1} \lambda_1^{0,1}} + \tau \quad (6)$$

Średni czas przebywania w stanie $\overline{t_{\xi_2}}$ - S₂:

$$M(t_{\xi_2}) = \overline{t_{\xi_2}} = \int_0^{\infty} (1 - F_{20}(t)) dt = \begin{cases} \frac{(\mu_2)^2 e^{-(\tau_H - \tau_B)\mu_1} - (\mu_1)^2 e^{-\mu_2(\tau_H - \tau_B)}}{(\mu_2 - \mu_1)\mu_2\mu_1}, \\ \text{dla } \tau_H \geq \tau_B \\ \frac{\mu_2 + \mu_1}{\mu_2\mu_1} + (\tau_B - \tau_H), \\ \text{dla } \tau_B > \tau_H \end{cases} \quad (7)$$

Średni czas przebywania w stanie $\overline{t_{\xi_1}}$ - S₁:

$$M(t_{\xi_1}) = \overline{t_{\xi_1}} = \int_0^{\infty} (1 - F_{10}(t)) dt = \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} = \\ = \frac{\mu_2 - \mu_1}{2} [(\tau_H)^2 - (\tau_B)^2] - \mu_2 \left[-\left(\frac{\tau_H}{\mu_1} + \frac{1}{(\mu_1)^2}\right) e^{-\mu_1(\tau_H - \tau_B)} + \right. \\ \left. + \left(\frac{\tau_B}{\mu_1} + \frac{1}{(\mu_1)^2}\right) \right] + \mu_1 \left[-\left(\frac{\tau_H}{\mu_2} + \frac{1}{(\mu_2)^2}\right) e^{-\mu_2(\tau_H - \tau_B)} + \left(\frac{\tau_B}{\mu_2} + \frac{1}{(\mu_2)^2}\right) \right], \\ \text{dla } \tau_B < \tau_H, t_{\xi_1} = \tau_H, \tau_H \leq \tau_B \quad (8)$$

Obliczone wartości czasów przebywania urządzeń w poszczególnych stanach pracy mogą być wykorzystane do obliczenia współczynnika gotowości K_G. Współczynnik ten określa udział czasu, w których urządzenia są sprawne do całkowitego czasu ich działania i jest miarą jakościowego ich stanu. Wykorzystywany jest tzw. cykliczny łańcuch Markowa, będący powiązaniem stanów pracy: E₁ → E₂ → E₃ → ... E_n → E₁.

W dyskretnej fazowej przestrzeni parametry rozkładu Π zapisujemy jako:

$$\Pi = (\Pi_k, \quad k \in E) \quad (9)$$

$$\Pi_k = \frac{\overline{\rho_k t_{\xi_k}}}{t_{\xi_k}} \quad (10)$$

$$t_{\xi_k} = \sum_{k=0}^2 \overline{\rho_k t_{\xi_k}} \quad (11)$$

Gdzie: $\overline{t_{\xi_k}}$ – średni czas przebywania w stanie k ,

ρ_k - wektor stacjonarnego rozkładu łańcucha Markowa w stanie k .

Układ równań algebraicznych opisujących stan ustalony:

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_0 + P_{01} \\ \rho_2 = \rho_1 + P_{12} \\ \rho_0 + \rho_1 + \rho_2 = 1 \\ \rho_0 = \rho_1 P_{10} + \rho_2 P_{20} \end{cases} \quad (12)$$

Wchodzące wektory stacjonarnego rozkładu łańcucha Markowa:

$$\begin{aligned}\rho_0 &= \frac{1}{1 + P_{01} + P_{01} + P_{12}} \\ \rho_1 &= \frac{P_{01}}{1 + P_{01} + P_{01}P_{12}} \\ \rho_2 &= \frac{P_{01}P_{12}}{1 + P_{01} + P_{01}P_{12}}\end{aligned}\quad (13)$$

Przy czym $P_{01}=I$.

Wartość $t_{\xi k}$ i parametry stacjonarnego rozkładu Π :

$$\begin{aligned}t_{\xi} &= \frac{t_{\xi_0} + P_{01}t_{\xi_1} + P_{01}P_{12}t_{\xi_2}}{1 + P_{01} + P_{01}P_{12}} \\ \Pi_0 &= \frac{t_{\xi_0}}{t_{\xi_0} + P_{01}t_{\xi_1} + P_{01}P_{12}t_{\xi_2}} \\ \Pi_1 &= \frac{P_{01}t_{\xi_1}}{t_{\xi_0} + P_{01}t_{\xi_1} + P_{01}P_{12}t_{\xi_2}} \\ \Pi_2 &= \frac{P_{01}P_{12}t_{\xi_2}}{t_{\xi_0} + P_{01}t_{\xi_1} + P_{01}P_{12}t_{\xi_2}}\end{aligned}\quad (14)$$

Stosując łańcuchy Markowa otrzymuje się wyrażenie określające współczynnik gotowości K_G odcinka zawierającego współpracujące urządzenia:

$$K_G = \Pi_0 + \Pi_1 = \frac{t_{\xi_0} + P_{01}t_{\xi_1}}{t_{\xi_0} + P_{01}t_{\xi_1} + P_{01}P_{12}t_{\xi_2}}\quad (15)$$

PODSUMOWANIE

Przedstawiono model matematyczny modułu technologicznego poddanego działaniu potoków uszkodzeń i napraw oraz wpływu zasobników części na jego produktywność a ponadto:

1. Wskazano, że do opisu zdarzeń zachodzących wewnątrz modułu i wymagany jest aparat matematyczny umożliwiający uzyskanie wyników adekwatnych do zachodzących w warunkach produkcyjnych.
2. Stworzono model matematyczny oddziaływań pomiędzy modułem a zasobnikiem opisany za pomocą funkcji rozkładu, funkcji gęstości rozkładu czasu pomiędzy uszkodzeniami. Określono równania opisujące czas pozostawania komórki w każdym ze stanów.

BIBLIOGRAFIA

1. Goel L., Srivastava P., Gupta R.: *A two unit cold standby system with correlated failure and repair*. International Journal of System Science, n 23, 2002, pp. 379 – 391.
2. Goel L., Srivastava P.: *A warm standby redundant system with correlated failures and repairs*. International Journal of System Science, n 32, 2008 pp. 793 – 797.
3. Goel L., Mumtaz S.: *Stochastic analysis of a complex system with an auxiliary unit*. Communication. Statistic Theory Method, n 23, 2004, pp. 3003 – 3017.

4. Gupta R., Chaudhary A.: *Stochastic analysis of a priority unit standby system with repair machine failure*. International Journal of System Science, n 26, 1995, pp. 2435 - 2440.
5. Jaiswal N., Krishna J.: *Analysis a two – dissimilar unit standby redundant system with administrative delay in repair*. International Journal of System Science, n 11,1998 pp. 495 – 511.
6. Kopp. W, Obżerin J., Piesczanskij A.: *Stochasticzeskije modeli awtomatizirovannykh proizvodstwiennykh sistiem z wriemiennom riezierwowanijem*. Sewastopol, 2000.
7. Krzywonos L.: *Analiza eksploatacyjnego przebiegu zużycia samochodowego silnika spalinowego w oparciu o modele stochastyczne*. W: Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych. Komisja Naukowo-Problemowa Motoryzacji PAN Oddział w Krakowie, Zeszyt 7, Kraków 1996, s.43-50.
8. Naidu R., Gopalan M.: *On the stochastic behaviour of a 1- server 2 – units system subject to arbitrary failure, random inspection and two failure modes*. Microelectronical Reliability, n 24, 1984, pp. 375 – 378.
9. Nieoczym A.: *Badania teoretyczne pracy komórki montażowej w aspekcie produktywności jej elementów*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004
10. Nieoczym A.: *Badania symulacyjne systemu produkcyjnego obsługiwane przez AGV;*. Logistyka, 2011, nr 6, str. 2017 – 3026
11. Nieoczym A.: *Zastosowanie dekompozycji systemu montażowego do określenia jego parametrów funkcjonalnych*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Komisja Budowy Maszyn PAN, vol. 21, nr 2, 2001.
12. Nieoczym A.: *Analiza niezawodności systemu montażowego*. Eksploatacja i Niezawodność, nr 1, 2002.
13. Nieoczym A., Poleszak J.: *Transport bliski i magazynowanie w układach obróbkowych i montażowych*, Logistyka nr 5/2011, str. 1193-1199

METHODOLOGY OF CALCULATIONS OF THE RELIABILITY OF ACTION COOPERATING DEVICES

Abstract

Generally known mathematical models of functioning of production systems are based on exponential equations of the description of states of the work. However these models tested on real systems are giving divergent results, in particular at assuming the individual values of streams of damage and repairs of cooperating devices. Based on widely accepted methodology, they caused the disintegration of the production system to basic modules and then analysis of functional connections between them was conducted. Mathematical apparatus based on the Erlang's schedule to the purpose of the description was applied probability of staying in each of states the work and the probability density function. A mathematical description of states of the work and criteria resulting from them of the reliability of influences was presented.

Autorzy:

Dr inż. **Aleksander Nieoczym**, dr inż. **Leszek Krzywonos** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, email:a.nieoczym@pollub.pl, l.krzywonos@pollub.pl