

Ryszard KOPKA

POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
ul. Gen. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole

Szacowanie czasu uszkodzeń parametrycznych zaworów regulacyjnych modelami stochastycznymi

Dr inż. Ryszard KOPKA

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Studia o specjalności Automatyka i Metrologia ukończył w 1995 r. Tytuł doktora uzyskał w 2004 r. Praca magisterska jak i doktorat powiązane z techniką światłowodową. Obecnie prowadzone przez autora prace dotyczą możliwości wykorzystania informacji o postępujących procesach degradacyjnych do oceny i szacowania funkcji niezawodności obiektów technicznych.



e-mail: r.kopka@po.opole.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki badań związanych z możliwością wykorzystania modeli stochastycznych do szacowania czasu do powstania uszkodzeń obiektów technicznych. Na podstawie obserwacji początkowego procesu degradacji szacowane są parametry modelu, a następnie przy ich pomocy symuluje się jego kontynuację. Osiągnięcie przez modelowany proces przyjętego poziomu granicznego, traktowane jest jako uszkodzenie urządzenia. Przedstawione rozwiązania teoretyczne wykorzystano do opisu degradacji zaworu regulacyjnego, modelowanego procesem opisanym arytmetycznym i geometrycznym ruchem Browna.

Słowa kluczowe: szacowanie czasu do uszkodzenia, procesy stochastyczne, arytmetyczny i geometryczny ruch Browna.

Estimating the time to soft failures of control valves based on stochastic models

Abstract

Use of technical devices always leads to degradation of their operating properties. Crossing a threshold level by the progressive degradation process is regarded as the so called 'soft failure' of a device (Fig. 1). When achieving such a state, there is need of repair or replacement of the device [7, 8]. Observing the first symptom of degradation, we can estimate the time in which the progressive degradation process reaches the limit value (Fig. 2). This allows us to predict the downtime and repair. The paper presents results of the work associated with use of stochastic models for description of the progressive degradation processes taking places in control valves. Use of the model describing arithmetic (3) or geometric (6) Brownian motion is proposed. The presented theoretical solutions are used to describe the control valve degradation process. On a basis of the recorded measurements of the valve control signal (Fig. 4) there were determined the model parameters (6). Then the time to the critical state was predicted (Fig. 5). A similar procedure for the flow residue signal was also carried out (Figs. 6 and 7). In this better fitting was achieved when assuming the model (3). The degradation processes contain important information about both current reliability level of a device and properties needed by the control algorithm. The possibility of their measuring and analysing can specify the time of soft turning the device off and can influence the procedures of its control. A significant problem is accuracy assessment. Using stochastic models it is possible based only on quantile lines received by multiple simulations of the considered process.

Keywords: estimating time to failure, stochastic processes, arithmetic and geometric Brownian motion.

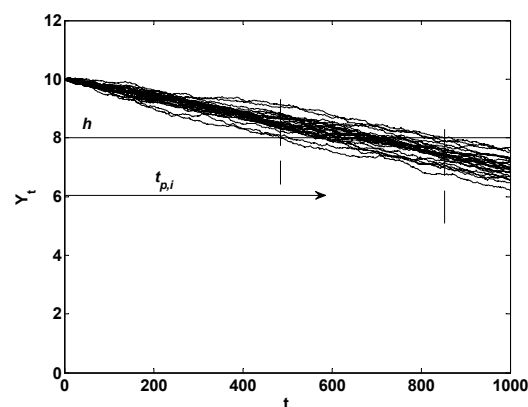
1. Wprowadzenie

Efektywne zarządzanie współczesnymi procesami technologicznymi wymaga stosowania coraz bardziej zaawansowanych algorytmów i procedur sterowania. Wzrost wymagań jakościowych i niezawodnościowych oraz ciągły rozwój mocy obliczeniowej dzisiejszych systemów sterowania znacząco przyspiesza implementację takich rozwiązań. Nowoczesne układy coraz częściej oferują algorytmy regulacji predykcyjnej, adaptacyjnej,

regulatory od stanu, regulatory rozmyte, regulację z modelem procesu [1] i wiele innych [2, 3, 4, 5, 6]. Stosowane są układy regulacji wielowymiarowej oraz procedury optymalizacji w punkcie pracy [7]. Pomimo rozwoju systemów pomiarowych i samych metod prowadzenia pomiarów, istotną grupą algorytmów sterowania stanowią algorytmy tolerujące uszkodzenia. Ważną rolę w zakresie zaawansowanych algorytmów sterowania zajmują algorytmy diagnostyczne [7]. Ich zadaniem jest wczesne wykrywanie pojawiających się uszkodzeń. Taka wczesna diagnoza pozwala na podjęcie odpowiednich działań profilaktycznych i zabezpieczających, ograniczając w ten sposób możliwość pojawienia się stanów zagrożeń i strat finansowych [8]. Na podstawie obserwacji rozwoju zachodzących procesów degradacyjnych algorytmy te mogą szacować czas, w którym kontrolowany proces osiągnie zdefiniowany poziom krytyczny, wymagający na przykład jego wyłączenia i/lub przeprowadzenia remontu. Prace związane z oceną stanu technicznego, oprócz automatyki, obejmują takie dziedziny jak mechanikę, elektrotechnikę czy elektronikę [9]. W pracy [10] przedstawiono mechanizmy procesów degradacyjnych zachodzących w bardzo dziś popularnych diodach elektroluminescencyjnych i laserach półprzewodnikowych. Praca [11] zawiera procedurę optymalizacji procesu testowania elektrozaworów na podstawie pomiarów zmian wartości przepływu. Możliwości oceny stanu technicznego elementów na podstawie obserwowanych zmian degradacyjnych przedstawili również Bogdanoff i Kozin [12], Hamada wraz z innymi w [13] oraz Meeker i Escobar [14]. Bae przedstawił różne modele teoretyczne opisujące możliwość szacowania niezawodności na podstawie przyjętych modeli i rozkładów zakłóceń [15].

2. Analiza procesu degradacji

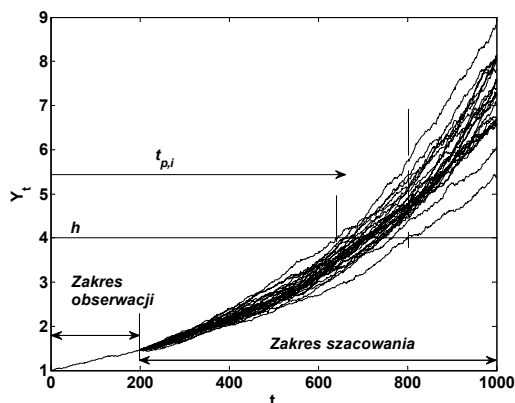
Każdy proces technologiczny pociąga za sobą powstawanie powolnych zmian destrukcyjnych urządzeń. W wielu przypadkach istnieje możliwość ich kompensacji poprzez odpowiednie układy regulacji. Przekroczenie jednak określonych wartości krytycznych może powodować znaczące pogorszenie jej jakości. Definiuje się więc pewien poziom - traktowany jako poziom graniczny, przekroczenie którego skutkuje koniecznością wyłączenia kontrolowanego procesu [16]. Osiągnięcie takiego stanu określane jest jako uszkodzenie parametryczne obiektu (rys. 1).



Rys. 1. Określenie czasu pojawienia się uszkodzeń parametrycznych, jako chwili przekroczenia poziomu granicznego h , t_{pi} – obserwowane czasy do uszkodzeń parametrycznych

Fig. 1. Definition of parametric failures, as the moment of crossing the threshold level h by degradation processes, t_{pi} – observed times to parametric failures

Istotną własnością systemów diagnostycznych powinna być możliwość prognozowania rozwoju procesu uszkodzeń i ostrzegania o czasie, w którym proces ten osiągnie stan definiowany jako stan krytyczny (rys. 2).



Rys. 2. Prognozowanie czasu do uszkodzenia na podstawie obserwacji początkowego okresu procesu degradacji; t_{pi} – szacowane czasy do uszkodzeń parametrycznych

Fig. 2. Estimating the time to failure based on observation of the initial degradation process, t_{pi} – estimated times to parametric failures

W wielu przypadkach obserwacja procesu degradacji jest realizowana przez kontrolę pośrednich wielkości związanych z degradacją. Wynika to z zarówno z własności samego procesu jak i ograniczonych możliwości pomiarowych. Przykładem może być np. ocena stopnia sedymentacji zaworu na podstawie pomiaru wartości sygnału sterującego jego otwarciem, zapewniającej taką samą wartość przepływu lub ocena stopnia degradacji lasera na podstawie pomiaru prądu generującego taką samą moc optyczną. Posiadając model obserwowanego urządzenia lub procesu, jako wskaźnik rozwoju uszkodzeń wolno narastających, może być wykorzystana funkcja residuum.

Należy jednak zwrócić uwagę, że niektóre modele stochastyczne wykorzystywane do opisu tych funkcji, przyjmują tylko wartości dodatnie, co wyklucza ich zastosowanie dla niektórych rozwiązań.

3. Stochastyczne równania różniczkowe

W ogólnej postaci stochastyczne równanie różniczkowe może być przedstawione jako

$$dy_t = F(t, y_t)dt + G(t, y_t)dW_t, \quad (1)$$

gdzie funkcja $F(\cdot)$ jest nazywana dryftem, a $G(\cdot)$ zmiennością procesu [17, 18]. Ich wartości są funkcją czasu oraz wektora stanu y_t . dW_t reprezentuje proces Wienera, to jest proces stochastyczny określony dla $t \geq 0$ i spełniający warunki:

1. $W_0 = 0$,
2. $W_{t+h} - W_t \sim N(0, h) \forall t, h > 0$,
3. przyrosty $W_{t_1} - W_{t_0}, \dots, W_{t_n} - W_{t_{n-1}}$ dla każdego

$t_0 < t_1 < \dots < t_n$ są niezależne.

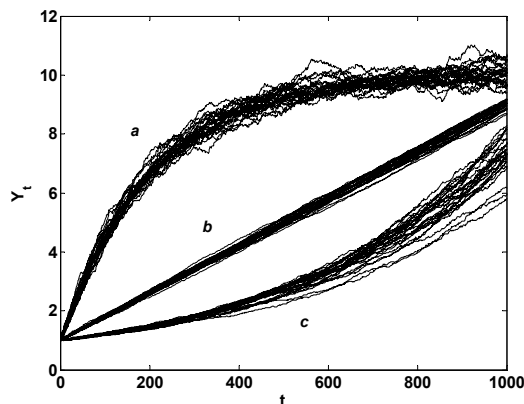
Przyjmując odpowiednią postać funkcji $F(\cdot)$ oraz $G(\cdot)$, modelem (1) można prognozować rozwój uszkodzeń wewnątrz urządzeń technicznych, narastających według różnych trendów. Rysunek 3 przedstawia przykładowe realizacje takich procesów dla modeli: liniowych, logarytmicznych i wykładniczych. Zakładając stałość parametrów funkcji $F(\cdot)$ oraz $G(\cdot)$ w czasie i ich niezależność od wektora y_t , równanie (1) będzie miało postać

$$dy_t = \mu dt + \sigma dW_t, \quad (2)$$

gdzie μ i σ reprezentuje odpowiednio dryft i zmienność. Przyjmując warunek początkowy $y(0) = y_0$, rozwiązaniem jest proces liniowy dany postacią

$$y_t = y_0 + \mu t + \sigma W_t \quad (3)$$

nazywany *arytmetycznym ruchem Browna*.



Rys. 3. Przykładowe realizacje postępujących procesów degradacyjnych: (a) – model logarytmiczny, (b) – model liniowy, (c) – model wykładniczy
Fig. 3. Example of different degradation processes: (a) - concave model, (b) linear model, (c) - convex model

Przyjmując natomiast

$$F(t, y_t) = \mu y_t \quad \text{oraz} \quad G(t, Y_t) = \sigma y_t \quad (4)$$

po podstawieniu do równania (1), otrzymuje się proces

$$dy_t = \mu y_t dt + \sigma y_t dW_t, \quad (5)$$

dla którego po zastosowaniu formuły całkowania Itô wraz z warunkiem początkowym $y(0) = y_0$, otrzymuje się rozwiązanie

$$y_t = y_0 \exp \left[\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma W_t \right]. \quad (6)$$

Proces ten ma postać funkcji wykładniczej i jest nazywany *geometrycznym ruchem Browna*. Oszacowanie parametrów procesów podanych równaniem (3) i (5) dokonywane jest na podstawie obliczonych szeregów różnic analizowanych wartości. Dla zależności liniowych, wartości różnic sygnału określa się jako

$$r_i = p_{i+1} - p_i, \quad (7)$$

gdzie p_i są to zmierzone wartości wielkości opisującej proces degradacji. Natomiast w przypadku funkcji wykładniczej, wartości tych różnic są określone jako

$$r_i = \ln \frac{p_{i+1}}{p_i}. \quad (8)$$

Na podstawie tak otrzymanych szeregów różnic można szacować parametry procesów (3) i (5). Dla parametru dryftu, jako

$$\hat{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i \quad (9)$$

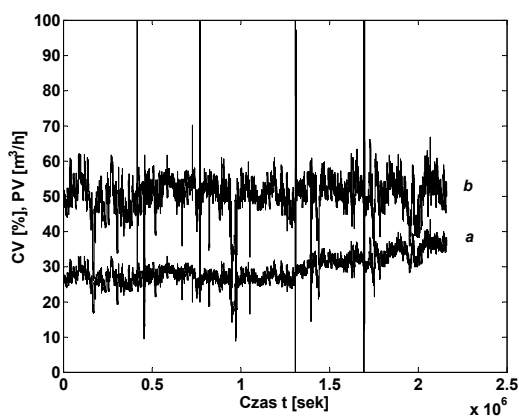
oraz dla parametru zmienności, jako:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (r_i - \hat{\mu})^2}, \quad (10)$$

przyjmując r_i odpowiednio ze wzoru (7) lub (8). Należy zwrócić uwagę, że w wielu przypadkach procesy degradacyjne nie tylko przyjmują wartości dodatnie, ale mają dodatkowo charakter monotoniczny. Park i Padgett w pracach [19] i [20] zaproponowali proces gamma spełniający te dodatkowe wymagania. Wykorzystanie analizy matematycznej daje również duże możliwości w zakresie szacowania niezawodności na podstawie prowadzonych przyspieszonych procesów degradacyjnych. Obserwując zachodzące procesy starzeniowe w takich warunkach oraz znając wpływ wielkości przyspieszających na proces starzenia, można określić niezawodność obiektów w trakcie ich normalnej eksploatacji [19, 21].

4. Szacowanie czasu do uszkodzenia

Przedstawioną w Rozdziale 3 analizę wykorzystano do modelowania wolnozmiennych zmian destrukcyjnych zachodzących w zaworze regulacyjnym. Jednocześnie przyjmując pewien poziom graniczny sygnału sterującego, oszacowano czas pozostały do jego osiągnięcia, co może być traktowane jako pojawienie się uszkodzenia parametrycznego, skutkującego koniecznością zatrzymania procesu technologicznego. Zachodzące wewnątrz zaworu procesy osadzania, powodują efektywne zmniejszenie przepływu, co wymusza zmianę sygnału sterującego tak, aby utrzymać wartość przepływu na stałym poziomie. Dla potrzeb diagnostyki takiego układu, można obserwować zarówno zmiany sygnału sterującego wielkością otwarcia zaworu, jak i sygnał różnicy (residuum) pomiędzy rzeczywistym wyjściem (przepływem), a wyjściem modelu zaworu. Rysunek 4 przedstawia otrzymane podczas pomiarów przebiegi strumienia przepływu syropu cukrowego oraz wartość sygnału sterującego kątem otwarcia zaworu regulacyjnego.



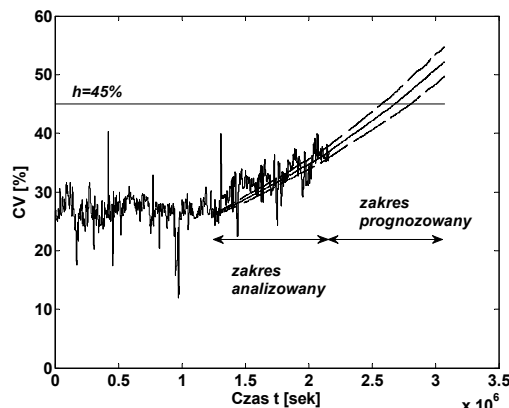
Rys. 4. Sygnał sterujący kątem otwarcia zaworu regulacyjnego CV (przebieg a) oraz wartość strumienia przepływu PV (przebieg b) zaworu regulacyjnego
Fig. 4. The valve control signal (CV line a) and flow (PV line b)

Wyraźnie widać, że wraz z upływem czasu wartość tego sygnału stopniowo wzrasta, a mimo to przepływ pozostaje na stałym poziomie. Przed rozpoczęciem procedury szacowania sygnały poddano filtracji. Następnie analizując sygnał sterujący wyznaczono chwilę rozpoczęcia się procesu stopniowych zmian własności zaworu. Na tej podstawie wyznaczono przedział czasowy, który posłużył do oszacowania parametrów równania procesu stochastycznego. Zgodnie z równaniem (8) obliczono zmienność sygnału i na tej podstawie wyznaczono parametry modelu stochastycznego, jako (9) i (10).

Przyjęto model opisany geometrycznym ruchem Browna postaci (6). Jako parametry modelu otrzymano:

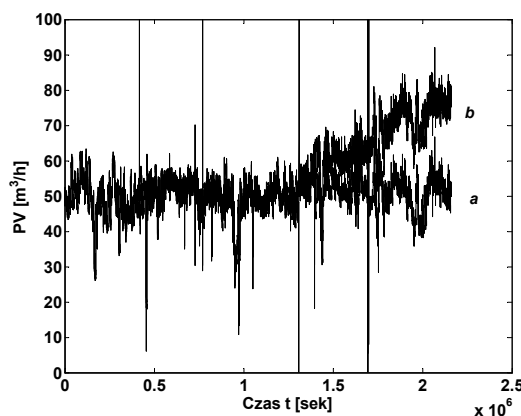
$$\hat{\mu}_{GBM} = 3.7617 \times 10^{-7} \text{ oraz } \hat{\sigma}_{GBM} = 3.3732 \times 10^{-5}.$$

Na podstawie oszacowanych parametrów przeprowadzono symulację analizowanego procesu wraz z jej kontynuacją poza zakres pomiarów. Rysunek 5 przedstawia otrzymane wyniki, wraz z zaznaczonymi zakresami analizy oraz prognozy. Linia ciągłą zaznaczono wartość średnią z przeprowadzonych symulacji, a linie przerywane wyznaczają przedział o szerokości jednego odchylenia standardowego.



Rys. 5. Prognozowanie czasu do osiągnięcia stanu krytycznego na podstawie obserwacji sygnału sterującego wielkością otwarcia zaworu z wykorzystaniem modelu opisanego geometrycznym ruchem Browna. Linia ciągła – wartość średnia z modelowanych procesów, linie przerywane oddalone od wartości średniej o jedno odchylenie standardowe, h – przyjęty poziom krytyczny
Fig. 5. Predicting time to critical state based on observation of the control signal and geometric Brownian motion model. Solid line – mean value of the modeled processes, dashed lines away from the average value of one standard deviation, h – threshold level

Drugi przykład związany jest z analizą residuum sygnału przepływu. Na podstawie obserwacji wartości sygnału sterującego otwarciem zaworu oraz wartości przepływu w początkowym okresie produkcji, wyznaczono model zaworu i obliczono spodziewaną wartość przepływu (rys. 6).



Rys. 6. Monitorowanie procesu sedymentacji zaworu regulacyjnego na podstawie porównania przepływu zmierzzonego (przebieg a) oraz modelowanego (przebieg b)
Fig. 6. Monitoring the process of sedimentation in control valve based on comparison of the measured (a) and modelled (b) flow

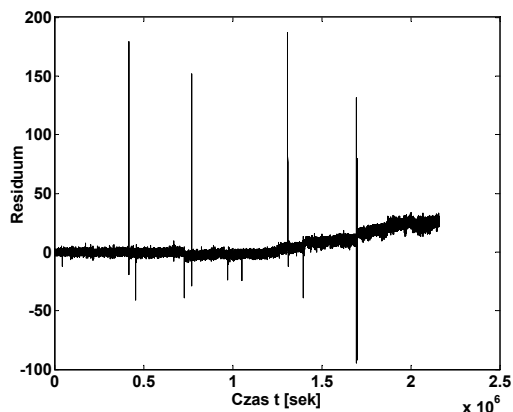
Rysunek 7 przedstawia charakterystykę zmiany sygnału residuum, świadcząca o zachodzących procesach degradacyjnych w zaworze.

Podobnie jak poprzednio określono przedział czasowy poddany analizie, ograniczony chwilą rozpoczęcia się procesu degradacji, z jednej strony, oraz końcem obserwacji – z drugiej. Na podstawie tych danych wyznaczono zmienność procesu.

Następnie wyznaczono parametry modelu zgodnie z równaniem (2). Przyjęto model opisany arytmetycznym ruchem Browna. Na podstawie równań (9) i (10), otrzymano:

$$\hat{\mu}_{ABM} = 2.8644 \times 10^{-5} \text{ oraz } \hat{\sigma}_{ABM} = 0.0026.$$

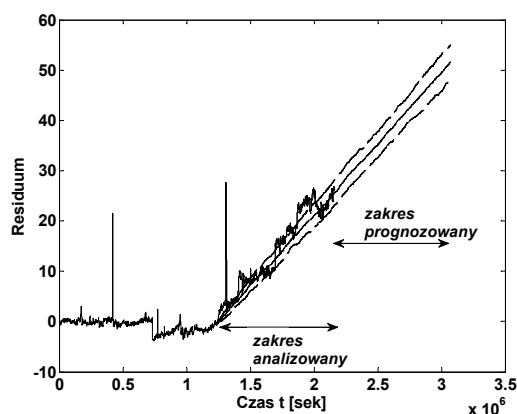
Podobnie jak poprzednio wykonano symulacje prognozowanych procesów wraz z ich kontynuacją poza zakres pomiarów.



Rys. 7. Zmiany sygnału residuum świadczące o zmianach charakterystyki przepływowej zaworu

Fig. 7. Changes in residue signal indicating the changes in valve flow characteristic

Rysunek 8 przedstawia otrzymane wyniki, wraz z zaznaczonymi zakresami analizy oraz prognozy. Linia ciągłą zaznaczono wartość średnią z przeprowadzonych symulacji, a linie przerywane wyznaczają przedział o szerokości jednego odchylenia standardowego.



Rys. 8. Prognozowanie czasu do osiągnięcia stanu krytycznego na podstawie obserwacji residuum z wykorzystaniem arytmetycznego ruchu Browna. Linia ciągła – wartość średnia z modelowanych procesów, linie przerywane oddalone od wartości średniej o jedno odchylenie standardowe

Fig. 8. Predicting time to critical state based on the residual signal and arithmetic Brownian motion model. Solid line - mean value of the modeled processes, dashed lines away from the average value of one standard deviation

Ocena dokładności oszacowania otrzymanych modeli, w przypadku stosowania stochastycznych równań różniczkowych, określona jest jedynie na podstawie wyznaczonych przedziałów ufności. Są one wyznaczane na podstawie wielokrotnych symulacji prognozowanych procesów degradacji. W pracy przyjęto szerokość przedziału określoną wielkością pojedynczego odchylenia standardowego dla poszczególnych chwil czasu symulacji.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania stochastycznych równań różniczkowych do szacowania czasu osiągnięcia poziomu granicznego procesów degradacyjnych. Wykorzystano modele opisane arytmetycznym i geometrycznym ruchem Browna odpowiednio do analizy zmian sygnału sterującego jak i sygnału residuum wielkości przepływu. Istotnym problemem jest jedno-

znaczne określenie poziomu granicznego. Jego wartość, definiowana jako stan znacznego pogorszenia jakości regulacji procesu, często wynika z indywidualnych rozwiązań konstrukcyjnych procesu. Musi więc być określany dla danego rozwiązania technologicznego. Problem nabiera jeszcze większego znaczenia w przypadku analizy residuum. Dalsze prace autora związane są z oceną dokładności modelowania procesów degradacyjnych, jak również z możliwością wykorzystania innych narzędzi i analiz stochastycznych.

Autor pragnie serdecznie podziękować prof. J. Kościelnemu z Politechniki Warszawskiej za udostępnienie danych pomiarowych dotyczących zachodzących procesów degradacyjnych.

6. Literatura

- [1] Brzózka J.: Regulatory i układy automatyki, MIKOM, Warszawa, 2004.
- [2] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: Diagnostyka Procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. WNT, Warszawa, 2002.
- [3] Ligęza A.: Logical Foundations for Rule-Based Systems. Uczelniane Wydawnictwa Naukowe – Dydaktyczne AGH, Kraków, 2005.
- [4] Moczulski W.: Diagnostyka techniczna: metody pozyskiwania wiedzy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.
- [5] Mulawka J.: Systemy ekspertowe, WNT, Warszawa, 1997.
- [6] Tatjewski P.: Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy, EXIT, Warszawa, 2002.
- [7] Korbicz J., Kościelny J. M.: Modelowanie, Diagnostyka i Sterowanie Nadrzędne Procesami. Implementacja w systemie DiaSter, WNT, Warszawa, 2009.
- [8] Kościelny J. M.: Diagnostyka Zautomatyzowanych Procesów Przemysłowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2001.
- [9] Kopka R.: Diagnostics of optical devices based on degradation processes, 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD 2009, 19-20 November 2009, Zielona Góra, Poland, 2009.
- [10] Fukuda M.: Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs, Artech House, Boston, 1991.
- [11] Yang G.: Reliability Demonstration Through Degradation Bogey Testing, IEEE Trans. Reliability, vol. 58, no. 4, s. 604-610, 2009.
- [12] Bogdanoff J. L., Koziar F.: Probabilistic Models of Cumulative Damage, John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [13] Hamada M. S., Wilson A. G., Shane Reese C. i Martz H. F.: Bayesian Reliability, Springer Science+Business Media, New York, 2008.
- [14] Meeker Q. W., Escobar A. L.: Statistical Methods for Reliability Data, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [15] Bae J. S., Kuo W., Kvam H. P.: Degradation models and implied life time distributions, Reliability Engineering and System Safety, vol. 92, s. 601-608, 2007.
- [16] Kopka R.: Ocena niezawodności obiektu na podstawie informacji o uszkodzeniach parametrycznych i katastroficznych, IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna DPS'2009 Gdańsk, s. 191-198, 2009.
- [17] Sobczyk K.: Stochastyczne Równania Różniczkowe, WNT, Warszawa, 1996.
- [18] Kopka R.: Reliability Assessment of Technical Devices Based on Degradation Data and Stochastic Equations, 8th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD 2010, 18-19 November 2010, Ferrara, Italy, 2010.
- [19] Park Ch., Padgett W.: Accelerated Degradation Models for Failure on Geometric Brownian Motion and Gamma Processes, Lifetime Data Analysis, vol. 11, no. 4, p. 511-527, 2005.
- [20] Park Ch., Padgett W.: Stochastic Degradation Models With Several Accelerating Variables, IEEE Trans. Reliability, vol. 55, no. 2, p. 379-390.
- [21] Zhao W., Elsayed E. A.: An Accelerated Life Testing Model Involving Performance Degradation. Reliability and Maintainability, Annual Symposium-RAMS, pp. 324-329, 2004.