

Andrzej NOWAKOWSKI¹

Piotr MAJERSKI²

ZASTOSOWANIE METOD STATYSTYCZNYCH DO MONITOROWANIA PROCESU OBRÓBKİ ELEKTROEROZYJNEJ ELEKTRODĄ DRUTOWĄ

Dla potrzeb monitorowania procesów wycinania i mikrowycinania elektroerozyjnego opracowano modele statystyczne wykorzystujące mechanizm średniej kroczącej. W przypadku wycinania średnia krocząca opisuje proces zmian wartości czasu opóźnienia wyładowań. Przy mikrowycinaniu średnia krocząca śledzi proces ewolucji wybranych trzech typów impulsów napięcia międzyelektrodowego. Przedstawione metody mogą być wykorzystane zarówno do kontroli przebiegu procesów WEDM jak i mikro-WEDM. Modele zweryfikowano w trybie *off-line*, wykorzystując zarejestrowane ciągi impulsów napięcia międzyelektrodowego oraz podczas obróbki, implementując go w mikroprocesorowych analizatorach procesu.

1. WPROWADZENIE

Wycinanie elektroerozyjne (WEDM) jest powszechnie stosowaną metodą obróbki twardych lub trudno obrabialnych materiałów przy pomocy wyładowań iskrowych. Wycinanie wykonywane jest elektrodą drutową o średnicy na ogół od 0,2 do 0,3mm przy wykorzystaniu impulsów prądu roboczego o amplitudzie rzędu kilkuset amperów. Dla potrzeb miniaturyzacji urządzeń, np. wykonywania precyzyjnych mechaniczno-elektrycznych mikrosystemów (MEMS), gdzie wykonywane są drobne elementy oraz wymagana jest duża dokładność i dobra jakość powierzchni obrobionej, klasyczne wycinanie elektroerozyjne jest mało przydatne. Mikrowycinanie elektroerozyjne, które pojawiło się w ostatnich latach, dzięki małej energii impulsów o amplitudzie prądu do kilkunastu amperów przy czasie rzędu kilkuset nanosekund, powoduje niewielkie zmiany warstwy wierzchniej i deformacji kształtu elementów cienkich i cienkościennych. Cienka elektroda o średnicy 100 μ m lub 50 μ m wraz z wysoką precyzją i submikronową rozdzielczością układów napędowych pozwalają na dokładne wykonywanie mikroelementów.

Istotnym problemem wycinania elektroerozyjnego było zawsze zrywanie elektrody drutowej, będące wynikiem termicznego osłabienia materiału drutu wskutek koncentracji

¹ Instytut Zawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Matematyki Stosowanej, Kraków

wyładowań (Jennes, Snoeyes i inni. [1]). Wstępne próby mikrowycinania przeprowadzone na zbudowanym w IZTW stanowisku wykazały, że podobne problemy występują także podczas mikrowycinania, a trudności narastają wraz ze zmniejszaniem średnicy elektrody drutowej.

Ze względu na brak możliwości bezpośrednich pomiarów stanu elektrody drutowej, metody monitorowania procesu bazują najczęściej na pomiarach wielkości elektrycznych wyładowania. Obara [2] oraz Shoda, Kaneko i in. [3] wykazali, że zrywanie drutu jest spowodowane jego nagrzewaniem w wyniku lokalizacji wyładowań i przedstawili metody oraz modele pozwalające wyznaczyć pozycję tej koncentracji. Ilościowy model (Cabanés, Portillo i in. [4]) w celu oceny stabilności procesu porównywał wartości trzech wskaźników z wartościami progowymi. Rajurkar i Wang [5] zaproponowali model statystyczny z filtrem dolnoprzepustowym estymujący częstotliwość wyładowań w celu predykcji zerwania drutu. Także Liao, Chu i in. [6] opracowali model statystyczny do sterowania czasem opóźnienia wyładowań na podstawie wyliczonych udziałów wyładowań normalnych i nieprawidłowych. Statystyczną metodę modelowania ciągów impulsów napięcia międzyelektrodowego, jako dwustanowych szeregów czasowych przedstawili Nowakowski i Szkutnik [7]. Do klasyfikacji impulsów na normalne i zwarciove wykorzystano dyskretną transformatę falkową. Regulatory oparte na logice rozmytej proponowali Liao, Yan i in. [8] oraz Tarng [9]. Natomiast sieci neuronowe do oszacowania stopnia degradacji procesu wycinania zastosowali Portillo i in. [10]. Dane wprowadzane do modelu wyznaczano wykorzystując LabView™ Real-Time module. Yan i Chien [17], Yan Huang i in. [12] wykonali stanowisko do badania procesu mikrowycinania i zaproponowali system dyskryminacji oraz strategię mającą na celu zmniejszenia częstotliwości występowania zwarć międzyelektrodowych i wyładowań łukowych. Impulsy klasyfikowano jako jałowe, normalne i łukowe na podstawie pomiaru maksymalnego napięcia podczas impulsu oraz czasu opóźnienia wyładowań.

Niniejszy artykuł proponuje zastosowanie stosunkowo prostych metod statystycznych do wyliczania zagrożenia zerwaniem elektrody roboczej podczas procesów wycinania i mikrowycinania. Ze względu na znaczną częstotliwość impulsów napięcia międzyelektrodowego preferowany był krótki czas wykonywania obliczeń.

2. STANOWISKA BADAWCZE

Badania wycinania elektroerozyjnego wykonano na stanowisku wycinarki MEDIOS-20. Zaprojektowano układ rejestrujący wielkości liczbowe charakteryzujące impulsy napięcia międzyelektrodowego, który pobierał dane z układu dyskryminatorów obwodów sterowania wycinarką. Dla każdego wyładowania rejestrowano czas opóźnienia wyładowania tj. czas od załączenia napięcia międzyelektrodowego do momentu wystąpienia wyładowania oraz wskaźnik binarny, charakteryzujący typ wyładowania: normalny lub zwarciovy. Dzięki temu badany proces został przedstawiony w postaci dwu szeregów liczbowych. Pamięć pozwalała na zapis danych dla 128 tys. kolejnych wyładowań. Zapis do

pamięci zatrzymywano po wykryciu zerwania elektrody drutowej, po czym dane pobierano i zapamiętywano na dysku komputera PC w celu ich dalszej obróbki. Przy tych samych nastawach parametrów wykonywano pomiar podczas obróbki bez zerwania drutu, aby umożliwić porównanie przebiegu obydwu procesów. Pomiary wykonano podczas wycinania stali narzędziowej o grubości od 20 do 100mm. Każdą próbę powtarzano dziesięć razy, przy małej i dużej energii impulsów.

Dla badań procesu mikrowycinania zbudowano stanowisko składające się z dwuosiowej mikrowycinarki, generatora, stacji dielektryka oraz sterownika CNC. Analizator impulsów wbudowano do obwodów sterowania generatorem. Wyładowania klasyfikowano na podstawie pomiaru amplitudy napięcia międzyelektrodowego przed wyładowaniem na czterech poziomach. Rezultat był zapisywany do pamięci w następującej postaci:

- liczba 0 – impuls zwarciowy,
- liczba 2 – wyładowanie normalne,
- liczba 3 – impuls jałowy,
- liczba 7 – zerwanie elektrody drutowej.

Ze względu na trudności pomiarowe spowodowane bardzo krótkim czasem impulsów nie wykonywano pomiaru czasu opóźnienia wyładowań. Pomiary wykonano podczas wycinania stali o grubości 1, 2 i 3mm elektrodą drutową o grubości 100 μ m i 50 μ m w zakresie nastaw czasu impulsów od 80ns do 700ns.

3. KONCEPCJA ŚREDNIEJ KROCZĄCEJ

Badania wykonywano w aspekcie zaimplementowania opracowanych modeli w układach sterowania wycinarki i mikrowycinarki. Zakładano, że obliczenia powinny być na tyle szybkie, aby można było je wykonywać przy wysokiej częstotliwości impulsów prądu roboczego, bez nadmiernego komplikowania układów obliczeniowych. Ze względu na wymagany krótki czas przetwarzania danych zdecydowano się na opracowanie modelu statystycznego (Nowakowski, Majerski [13]).

Przedmiotem analizy były:

- dwustanowy proces losowy - typ wyładowań:

$$X_1, \dots, X_t, \dots, X_T \quad (1)$$

gdzie dla każdego $t = 1, \dots, T$, $X_t \in \{0, 1\}$

- proces losowy zmierzonego czasu opóźnienia wyładowań:

$$Y_1, \dots, Y_t, \dots, Y_T \quad (2)$$

gdzie dla każdego $t = 1, \dots, T$, $Y_t \in \{0, 1, \dots\}$

W obydwu przypadkach T jest liczbą testowanych wyładowań.

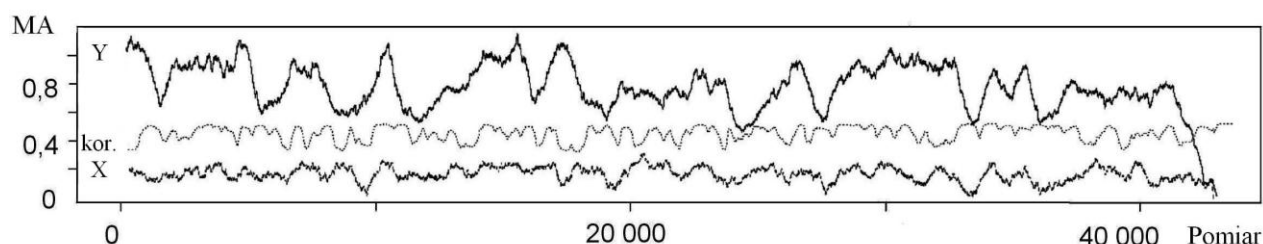
Do analizy stanów procesu wykorzystano średnią kroczącą MA (Brockwell, Davis [15]). Dla danego ciągu liczbowego Y_1, Y_2, \dots i nieujemnej liczby całkowitej q , średnia krocząca procesu Y jest definiowana jako:

$$MA_t(Y) = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q Y_{t+j} \quad (3)$$

gdzie $t = q+1, q+2, \dots$

Parametr q pełni funkcję zarówno parametru wygładzającego jak i okna pamięci. Analogicznie można zdefiniować średnią kroczącą procesu X .

Wartość parametru q w wyniku testów przyjęto jako 300, tak aby uzyskać reprezentatywny przebieg czasowy średniej. Porównanie wykresów $MA(X)$ i $MA(Y)$ wykazało że są one skorelowane, przy czym na ogół $MA(Y)$ zapewnia lepszą reprezentację stabilności procesu (rys. 3). Osie rzędnych wykresów przeskalowano i przesunięto w różny sposób tak, aby możliwe było zestawienie ich na jednym wykresie (rys. 1).



Rys. 1. Przeskalowane i przesunięte wykresy MA dla procesów X (dolny), Y (górny) oraz ich funkcja korelacji kor. (środek) dla procesu zakończzonego zerwaniem drutu. Grubość materiału 20mm

Fig. 1. Scaled and shifted graphs of the MA for X (lower line), for Y (upper line) and their correlation function kor. (middle line) for the degenerated process. Workpiece thickness 20mm.

4. MODEL PROCESU CZASU OPÓŹNIENIA PRZY WYCINANIU ELEKTROEROZYJNYM

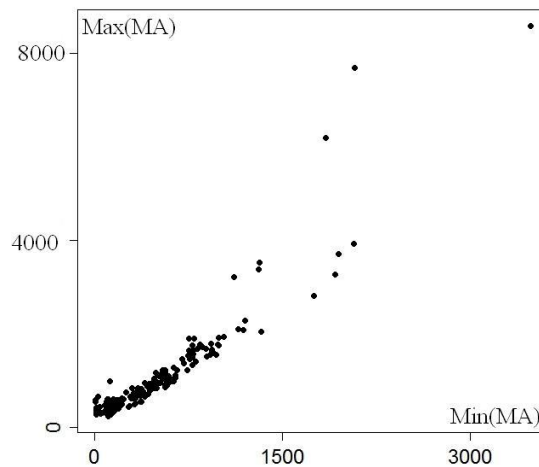
Podczas analizowania wartości czasu opóźnienia wyładowań zaobserwowano, że w zarejestrowanych zbiorach zachodzi w przybliżeniu liniowa zależność pomiędzy minimalnymi a maksymalnymi wartościami $MA(Y)$ (rys. 2). Tylko niektóre punkty odpowiadające procesowi przed zerwaniem drutu wyraźnie nie podlegały tej zależności.

Stwierdzono także, że na płaszczyźnie $max/minMA(Y)$ pojawia się separacja punktów należących do procesu stabilnego i zdegenerowanego oraz że energia impulsów ma także wpływ na ich rozmieszczenie (rys. 3).

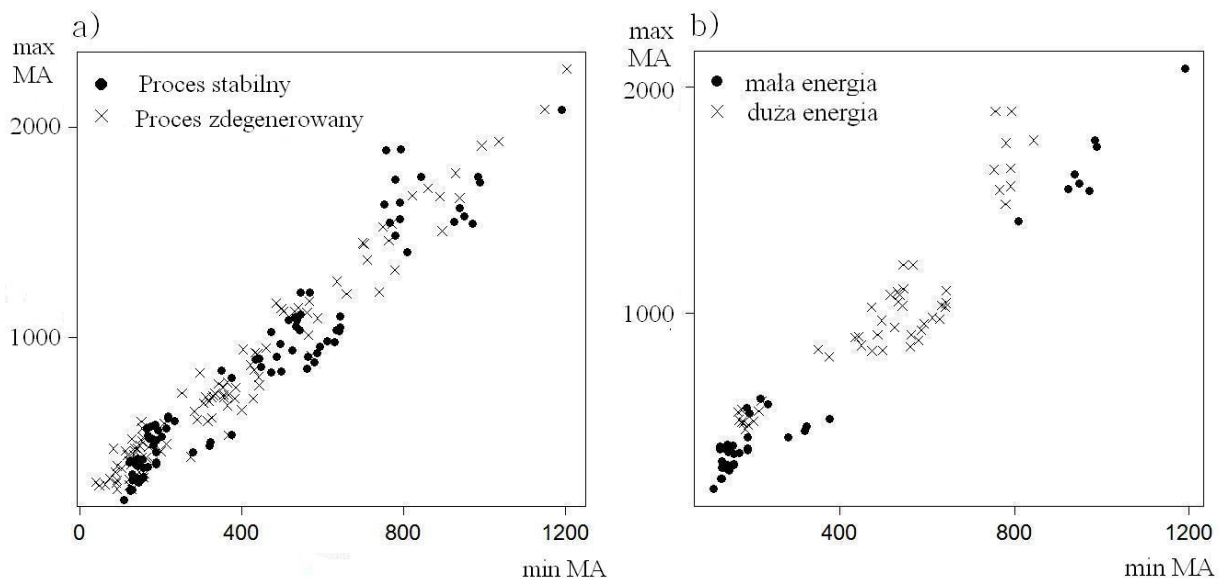
Dla każdej grubości wycinanego materiału i przy obydwu nastawianych energiach impulsów punkty, odpowiadające procesowi stabilnemu i zakończonemu zerwaniem drutu, grupowały się w różnych obszarach płaszczyzny. Z powyższych rozważań wynika, że proces

średniej kroczącej jest ważnym nośnikiem informacji o procesie wycinania. Dla sterowania wycinaniem proces maksimum $MA(Y)$ jest mało przydatny, gdyż w przypadku znacznego zmniejszenia prędkości wycinania przez regulator wycinarki, jego wartości znacznie się wydłużają i nie spełniają pokazanych zależności.

Natomiast minimum $MA(Y)$ zachowuje swoje prawidłowości i na ogół przed zerwaniem elektrody drutowej zmniejsza lub zwiększa swoją wartość. Ponieważ test Shapiro-Wilka nie dał podstaw do odrzucenia hipotezy, że proces minimum $MA(Y)$ pochodzi z rozkładu normalnego, można było przyjąć kryterium degradacji procesu wycinania polegające na sprawdzaniu, czy wartość $MA(Y)$ mieści się w 95% przedziale ufności.



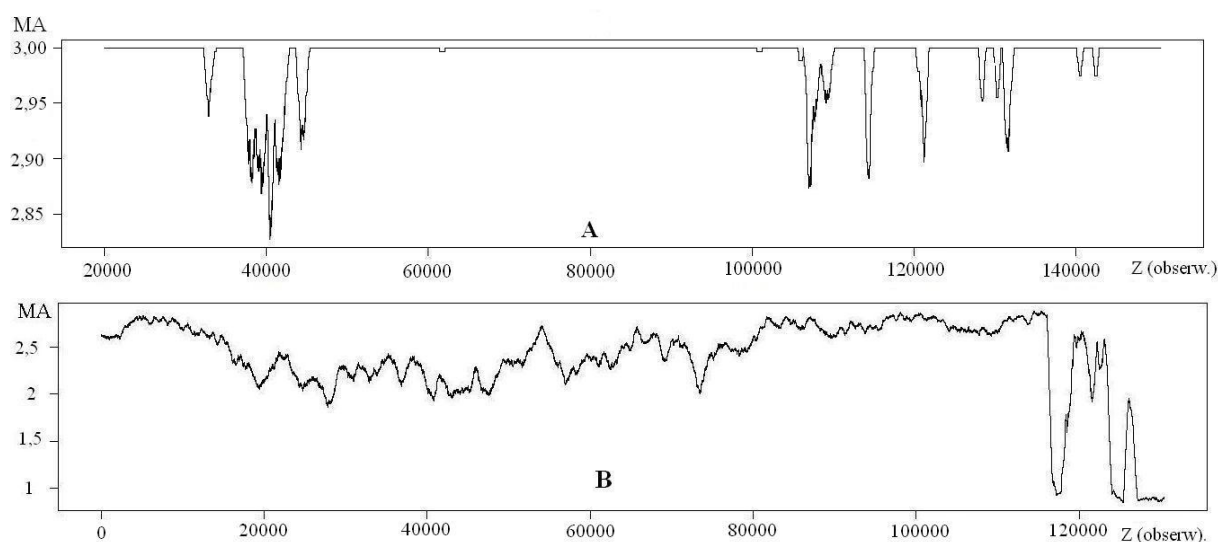
Rys. 2. Zależność maksimum $MA(Y)$ od minimum $MA(Y)$
Fig. 2. The dependence of the maximum on the minimum for the $MA(Y)$



Rys. 3. Zależność maksymalnych i minimalnych wartości $MA(Y)$. Punkty klasyfikowane ze względu na: a) stabilność procesu, b) energię impulsów prądu roboczego
Fig. 3. The dependence of the minimum on the maximum for the $MA(Y)$. Points classified into: a) stable and degenerated process, b) the level of energy of working current pulses for the stable process data sets

5. MODEL DEGRADACJI PROCESU MIKROWYCINANIA ELEKTROEROZYJNEGO

W zarejestrowanych przebiegach proces wykazywał małe zróżnicowanie przyjmowanych wartości. W okresie stabilności obserwacje przyjmują prawie zawsze wartość maksymalną – sporadycznie obserwowana była wartość 2, co świadczy o niewielkiej sprawności procesu. Z tego powodu koncepcja modelowania procesu czterostanowym łańcuchem Markowa (lub jego możliwą modyfikacją, np. procesem o dłuższej strukturze zależności) została definitywnie odrzucona na etapie analizy rozpoznawczej. Dużo większe szanse powodzenia miał model nieparametryczny wykorzystujący proces średniej kroczącej. Podobnie jak w przypadku $MA(Y)$ przyjęto parametr q równy 300. Również najbardziej odpowiednią statystyką opisującą degenerację okazała się wartość minimalna procesu $MA(Z)$. Przykładowe wykresy średniej kroczącej dla procesu normalnego i zakończonego zerwaniem drutu pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Średnia krocząca $MA(Z)$ dla: (A) procesu normalnego, (B) zakończonego zerwaniem drutu.

Grubość materiału 1mm, średnica drutu 100 μ m

Fig. 4. Moving average $MA(Z)$ for: (A) the normal process, (B) the process that ends up with wire rupture.

Workpiece thickness 1mm, wire diameter 100 μ m

Wyniki dla różnych nastawień parametrów okazały się bardzo zbliżone. Na podstawie przebiegu MA dla procesu stabilnego wyestymowano minimalną wartość progową procesu, determinującą przejście w stan krytyczny. Dla różnych nastawień wartość ta wahała się w zakresie 2,84-2,93. Procesy zakończone zerwaniem wykazują często wartość MA bliską zeru, a zwykle przed zerwaniem ta wartość spada poniżej podanej wartości progowej WP . Procesy normalne nie schodzą poniżej tej wartości. Wyjątek stanowią sytuacje długotrwałego zwarcia, gdyż jest to oczywisty stan patologiczny, więc nie zmienia to poprawności reguły decyzyjnej opartej na tej wartości progowej.

6. ALGORYTM WYLICZANIA WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA ZAGROŻENIA ZERWANIEM ELEKTRODY DRUTOWEJ

Aby umożliwić ilościową ocenę stanu degradacji procesu zaproponowano algorytm wyliczający współczynnik zagrożenia WZ zerwaniem elektrody drutowej. Przebieg pętli obliczeń był następujący:

- dyskryminacja impulsu napięcia międzyelektrodowego i zapamiętanie $N = 300$ obserwacji czasu opóźnienia wyładowania lub wartości liczbowej 0,2 lub 3;
- z trzystu obserwacji wyliczenie MA i zapamiętanie jako kolejny element wektora T ;
- powyższy proces trwa aż do zapelnienia wektora T ;
- obliczenie minimum m wektora T
- modyfikacja wartości progowej WP zgodnie ze schematem:
 - jeśli ($m < WP$) to $WZ = WZ + 1$, w przeciwnym przypadku $WZ = WZ - 1$,
 - jeśli ($WZ < 0$) to $WZ = 0$,
 - jeśli ($WZ > 5$) to $WZ = 5$,
- przesunięcie wektora T w lewo

Powyższy algorytm przetestowano najpierw wykorzystując zarejestrowane fragmenty procesów wycinania i mikrowycinania. Następnie opracowano oprogramowanie sterownika mikroprocesorowego wykonującego obliczenia w czasie obróbki. Obliczenia okazały się wystarczająco szybkie w zakresie częstotliwości wycinania, natomiast podczas mikrowycinania tylko do ok. 3MHz. Obserwacja wyliczanej wartości progowej WP wykazała, że sterownik poprawnie reagował na chwilowe zaburzenia procesu, jednak metoda okazała się wrażliwa na zmiany parametrów obróbki, które każdorazowo wymagały modyfikacji wartości progowej WP . Wskazuje to na konieczność uzupełnienia algorytmu o mechanizm adaptacyjny, wyliczający WP na podstawie trendu wyznaczanego przy znacznie dłuższej stałej czasowej niż obliczenia MA .

7. ZAKOŃCZENIE

Procesy wycinania i mikrowycinania, z fizycznego punktu widzenia, różnią się wartością energii wyładowań oraz czasem impulsów prądu roboczego. Obydwie te wielkości przy mikrowycinaniu są przynajmniej o rząd mniejsze. Także cienka elektroda drutowa mikrowycinarki jest bardziej podatna na wpływ czynników zaburzających. Pomimo to, okazało się, że można wykorzystać ten sam model statystyczny do testowania procesu w trybie *on-line*. Wprawdzie, przy nastawie wysokiej częstotliwości wyładowań mikrowycinarki, czas wymagany na obliczenia okazał się za krótki, ale jak wykazały próby technologiczne, jest to zakres rzadko wykorzystywany. W razie potrzeby można zastosować szybszy procesor (używano sterownika z procesorem ARM7). Wycinanie elektroerozyjne jest procesem wieloparametrowym i tylko ich część ma wartość zdeteminowaną. Dlatego można zrozumieć przyczyny wrażliwości modelu na zmiany parametrów niezdeteminowanych. Mogą one wynikać z chwilowego stanu procesu, wtedy model

reaguje na nie prawidłowo, ale mogą one być wynikiem czynników długotrwałych, jak np. temperatura dielektryka, które powinien kompensować układ adaptacyjny.

Pracę zrealizowano w ramach projektu N N503 360135 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] JENNES M., SNOYES R, DEKEYSER W., 1984, *Comparison of various approaches to model of the thermal load on the EDM wire electrode*, Annals of the CIRP, 33, 93-98.
- [2] OBARA H., 1992, *Detection of discharges position on the wire EDM*, Proceed. Int. Symp. for Electr. Mach. ISEM X, Magdeburg, 404-409.
- [3] SHODA K., KANEKO Y., NISHIMURA H., FAN M.X., 1992, *Adaptive control of WEDM with On-Line Detection of Sparc Location*, Proceed. Int. Symp. for Electr. Mach. ISEM X, Magdeburg, 410-416.
- [4] CABANES I., PORTILLO E., MARCOS M., SANCHES J. A., 2008, *An industrial application for on-line detection of instability and wire breakage in wire EDM*, Journal of Materials Processing Technology, 195, 101-109.
- [5] RAJURKAR K. P., WANG W. M., 1991, *On-line monitor and control system for wire breakage in WEDM*, Annals of the CIRP, 40, 219-222.
- [6] LIAO Y. S., CHU Y. S., YAN V., 1997, *Study of wire breaking process and monitoring of EDM*, Int. Journal of Machining Tools and Manufacturing, 37, 555-567.
- [7] NOWAKOWSKI A., SZKUTNIK Z., 2004, *Using random sequences for WEDM process states discrimination*, Proceedings of the VIIth International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing, Zakopane, 19-21.
- [8] LIAO Y. S., YAN M. T., 1996, *A self-learning fuzzy controller for wire rupture prevention in wire EDM*, Int. J. of Adv. Manuf. Technol., 114/267-275.
- [9] TARNG Y. S., TSENG C.M., CHUNG L.K., 1997, *A fuzzy pulse discriminating system for electrical discharge machining*, Int. Journal of Machining Tools and Manufacturing, 37, 511-522.
- [10] PORTILLO E., CABANES I., MARCOS M., SANCHES J.A., 2007, *Anticipation of wire breakage in WEDM based on neural networks*, Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining. Pittsburgh, USA, 23-27, 133-138.
- [11] YAN M. T., CHIEN H.T., 2007, *Monitoring and control of the microwire-EDM process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 148-157.
- [12] YAN M. T., HUANG C.W., FANG C.C., CHANG C.X., 2004, *Development of a prototype Micro-Wire-EDM machine*, Journal of Materials Processing Technology, 149, 99-105.
- [13] NOWAKOWSKI A., MAJERSKI P. 2011, *Statistical evaluation of the WEDM process degradation*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 35, 71-83.
- [14] BROCKWELL P. J., DAVIS R.A., 1991, *Time series: theory and methods (2nd ed.)*, Springer-Verlag, New York.

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS IN THE MONITORING OF THE EDM MACHINING WITH WIRE ELECTRODE

The paper presents investigations of the WEDM and micro-WEDM processes degeneration, carried out with MEDIOS-20 and the experimental micro-WEDM machine MW50 type developed in IZTW. The measuring stand consisted of the WEDM machines connected with the gap voltage pulses analysers, the data logger, the PC computer with the dedicated software for data acquisition and processing. The main tool used for prediction of the both processes degeneration was the moving average (MA) model, endowed with a parameter q , which plays a role of a smoothing parameter as well as a 'memory' window. During the WEDM machining the subject of the analysis was the delay time of discharges. In the micro-WEDM process the data input for the model was the transient numerical time series received from the gap voltage discriminating system, which separated the gap voltage pulses into three classes: idle, normal and short, according to their amplitude before discharge and the voltage drop during discharge. During the analysis it has been observed, that very often the MA for the degenerated processes decreased just before the wire braking, whereas this almost never happened for the stable one. Algorithms calculated the on-line process degradation level (WZ) were derived from the above model. The off-line verification of the presented models, performed with the registered data, showed their good reliability. The algorithm was both applied in a microprocessor controller and verified on-line during the machining.