

ZASTOSOWANIE STEROWNIKA ROZMYTEGO DO ZRÓWNOWAŻENIA OBCIĄŻENIA MASZYN W SYSTEMIE PRODUKCYJNYM

Grzegorz KŁOSOWSKI

Streszczenie: W artykule zaprezentowano koncepcję sterownika rozmytego, opartego na modelu Mamdaniego, którego celem było równoważenie obciążenia maszyn w systemie produkcyjnym. W tym celu zaprezentowano dwa modele systemów produkcyjnych składających się z czterech obrabiarek każdy. Wykonano eksperymenty symulacyjne celem porównania rezultatów funkcjonowania systemu produkcyjnego bez sterownika rozmytego oraz z wykorzystaniem ww. sterownika. Przeprowadzone eksperymenty dowiodły skuteczności opracowanego sterownika rozmytego. Wyniki eksperymentów zostały zaprezentowane w niniejszej pracy.

Słowa kluczowe: Symulacja, modelowanie, sterowanie, logika rozmyta, systemy produkcyjne.

1. Wprowadzenie

Podejmowanie decyzji odnoszących się do procesu produkcyjnego jest zagadnieniem złożonym. Powodem jest duża i trudna do zdefiniowania liczba czynników, mających wpływ na te decyzje [1]. Sterowanie rozmyte jest z powodzeniem stosowane w różnych aspektach zarządzania przedsiębiorstwem. W szczególności można wyróżnić kilka głównych dziedzin zastosowań tej techniki. Pierwszą z nich jest sterowanie i optymalizacja procesów. Przykładami zastosowań mogą być przypadki łączenia standardowych technik sterowania i logiki rozmytej w złożonych systemach sterowania [2] oraz zastosowanie logiki rozmytej do wyboru odpowiedniego rodzaju manipulatora dostosowanego do rodzaju przedmiotu [3]. Kolejną dziedziną jest sterowanie produkcją komórek produkcyjnych i maszyn. Przykładem jest zastosowanie sterownika rozmytego w dynamicznej organizacji wysyłek części po obróbce, dla poszczególnych komórek produkcyjnych [4]. W zakresie harmonogramowania produkcji, przykładem jest zastosowanie logiki rozmytej w odniesieniu do elastycznego systemu produkcyjnego (ESP), w którym planowanie odbywa się w oparciu o różnorodne wskaźniki wydajnościowe [5]. Również, w podobnym zakresie, logika rozmyta znajduje zastosowanie w harmonogramowaniu produkcji na bazie rozszerzonej metody ABC [6].

Celem badań zaprezentowanych w niniejszej pracy jest opracowanie sterownika umożliwiającego równomierne zużycie obrabiarek w systemie produkcyjnym. Obiektem badań jest system produkcyjny o dyskretym charakterze produkcji. System składa się z czterech obrabiarek o zbliżonych lecz niejednakowych zdolnościach produkcyjnych. Produkcja ma charakter średnioseryjny. Części podlegające obróbce są stosunkowo kosztowne i wymagają wysokiej precyzji obróbki. Różnice dotyczą czasów jednostkowych, jakimi charakteryzują się obrabiarki. Obróbka części będących przedmiotem zleceń produkcyjnych może być wykonywana na każdej z czterech obrabiarek. Z uwagi na wysoką precyzję obróbki, przedsiębiorstwu zależy na równomiernym obciążeniu (zużyciu)

wszystkich czterech obrabiarek, co przyczyni się do zachowania podobnej dokładności obróbki na wszystkich obrabiarkach. Istnieje obawa, że nadmierne eksploataowanie tylko jednej obrabiarki spowoduje, że po pewnym czasie parametry obróbkowe tej obrabiarki zaczną odbiegać od pozostałych. Z tego powodu problemem jest sterowanie przepływem produkcji w taki sposób, aby obciążenie wszystkich czterech obrabiarek było zrównoważone. Warto zauważyć, że w tym przypadku podstawowym problemem nie jest wydajność systemu produkcyjnego – lecz powtarzalność procesu wyrażająca się w wysokiej precyzji obróbki bez potrzeby częstych regulacji, konserwacji i napraw.

Poszukiwany jest sposób, który umożliwiłby takie przypisywanie części do poszczególnych obrabiarek, że spełnione byłyby następujące kryteria:

1. Zachowanie wysokiej precyzji obróbki przez wszystkie cztery obrabiarki,
2. Zachowanie równomiernego zużycia (obciążenia) wszystkich czterech obrabiarek,
3. Zachowanie ciągłości produkcji.

Najprostszym sposobem sterowania produkcją przy ww. ograniczeniach byłoby sterowanie ręczne. W takim przypadku należałoby wybrać doświadczonego operatora i powierzyć mu podejmowanie decyzji odnośnie kierowania poszczególnych części na odpowiednie maszyny. Biorąc jednak pod uwagę dużą ilość części obrabianych, a także subiektywizm decyzji pojedynczego człowieka, należy uznać to rozwiązanie za niewystarczające.

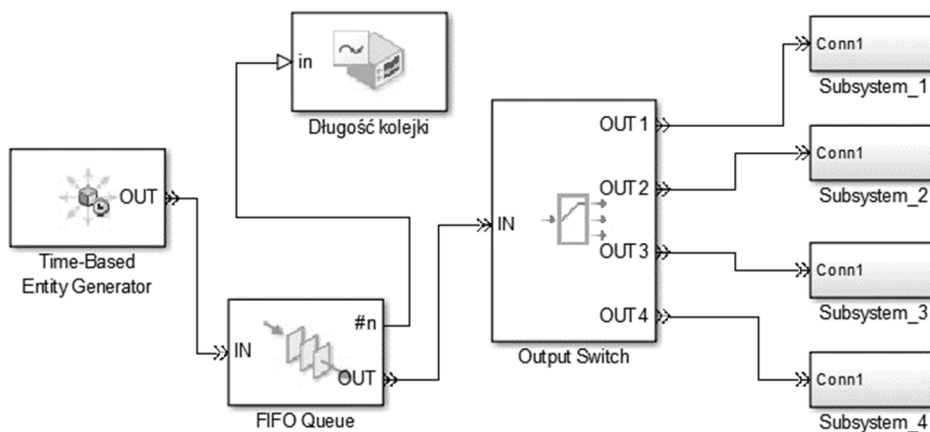
Bardziej satysfakcjonującym sposobem rozwiązania problemu może być opracowanie mechanizmu (sterownika), który uwzględniłby wszystkie zdefiniowane wcześniej kryteria. Sterownik ten musiałby funkcjonować w warunkach, które są kreślone dość ogólnie. Nie ma ściśle sformułowanej funkcji matematycznej, która mogłaby być w sterowniku zastosowana. Z tego względu wydaje się, że odpowiednim rozwiązaniem jest zastosowanie logiki rozmytej. Sterowniki działające w oparciu o logikę rozmytą są obecnie często stosowane w wielu dziedzinach życia. W szczególności, znajdują one zastosowanie w sprzęcie gospodarstwa domowego, w środkach transportu samochodowego, kolejowego i lotniczego. Sterowniki rozmyte pełnią rolę modułów decyzyjnych, które umieszczone w układach adaptacyjnych, uruchamiają lub wyłączają określone urządzenia. Mogą także przetwarzać różnorodne sygnały wejściowe na sygnał wyjściowy, który zazwyczaj jest liczbą rzeczywistą zawierającą się w określonym przedziale wartości. Liczba rzeczywista może być następnie klasyfikowana jako należąca do pewnego zbioru lub nie. Dzięki temu sygnał wyjściowy może mieć także charakter klasyfikacyjny.

W niniejszej pracy zaprezentowano przykładowy sterownik rozmyty, który w oparciu o dane wejściowe generuje sygnał wyjściowy, na podstawie którego następuje wybór konkretnej obrabiarki do obróbki określonej części.

2. Opis metody badań

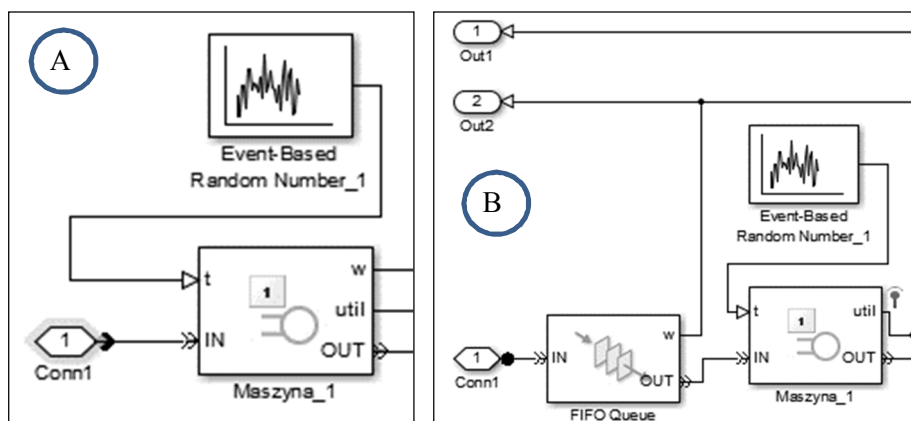
W badaniach zastosowano metodę symulacji komputerowej. Jak już wcześniej wspomniano, obiektem badań jest system produkcyjny o charakterze dyskretnym, który składa się z czterech obrabiarek. Opracowano więc dwa warianty modelu systemu produkcyjnego. Model pierwszy uwzględnia sterowanie przepływem produkcji wg prostej reguły pierwszej wolnej maszyny. W praktyce oznacza to, że w sytuacji kiedy należy przydzielić jakąś część do konkretnej obrabiarki, system sprawdza czy maszyna nr 1 jest wolna. Jeśli nie, to sprawdza kolejną maszynę i powtarza tę operację aż do czwartej obrabiarki. Jeśli wszystkie maszyny są zajęte, to sterownik rozpoczyna sprawdzanie

ponownie od maszyny nr 1. Procedura ta jest kontynuowana aż do momentu, w którym jedna z maszyn będzie już wolna. Wtedy sterownik przydziela część do tej właśnie maszyny.



Rys. 1. Model systemu produkcyjnego bez sterowania rozmytego

Model tak funkcjonującego systemu produkcyjnego prezentuje rys. 1. Części przemieszczają się od lewej do prawej strony modelu. Początkowym elementem modelu jest generator części (ang. Time-Based Entity Generator). Generator w sposób losowy, wprowadza do obróbki kolejną część, przy czym części te wprowadzane są nie częściej niż co 60 sekund i nie rzadziej niż co 300 sekund. Kolejnym elementem modelu jest magazyn części (ang. FIFO Queue). W magazynie części poruszają się wg porządku FIFO – czyli są kolejkowane. Następnie części są kierowane do przełącznika (ang. Output Switch), którego zadaniem jest przydzielanie części do maszyn. Za przełącznikiem znajdują się cztery obrabiarki. Podsystem maszyny nr 1 w modelu systemu produkcyjnego prezentuje rys. 2.



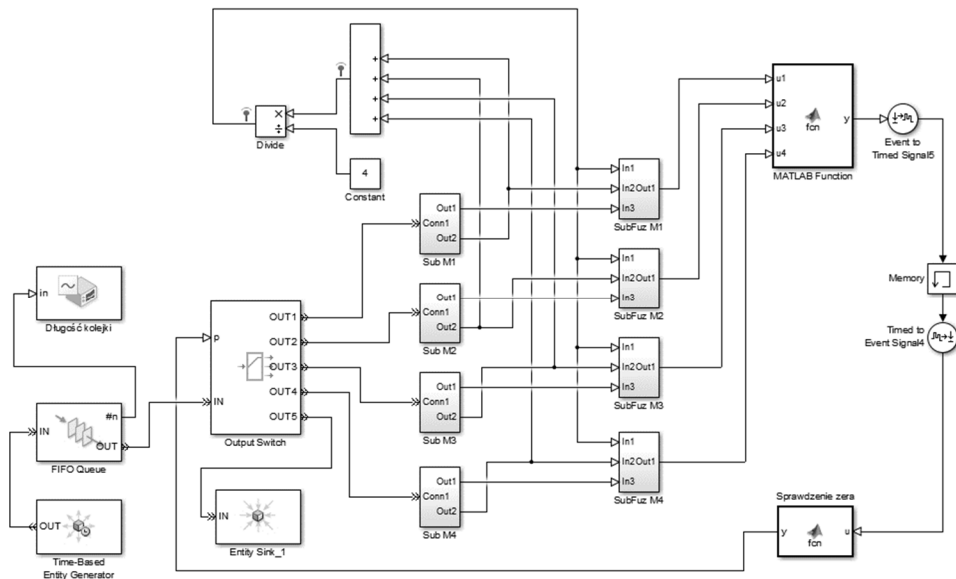
Rys. 2. Podsystem maszyny nr 1 w modelu systemu produkcyjnego

Rys. 2 składa się z dwóch części A (lewej) i B (prawej). Na rys. 2A pokazano maszynę nie podłączoną do sterownika rozmytego. Na rys. 2B, prezentującym obrabiarkę podłączoną do sterownika rozmytego, widać dwa dodatkowe sygnały wyjściowe (Out1 i Out2). Pierwszy

z nich przekazuje do sterownika rozmytego informacje o obciążeniu maszyny pracą. Jest to liczba rzeczywista z przedziału $(0, 1)$. Im parametr jest większy, tym większe obciążenie obrabiarki. Obciążenie jest wyliczane jako stosunek czasu pracy obrabiarki wyrażonego w sekundach do sumy czasu pracy i przerw w trakcie całej symulacji. Maksymalne obciążenie obrabiarki wynosi więc 1, a minimalne 0.

Parametr drugi (Out2) przekazuje informacje o średnim czasie oczekiwania części w magazynie buforowym znajdującym się przed obrabiarką. Parametr jest podawany w sekundach.

Model systemu produkcyjnego zawierający rozmyte sterowanie przepływem produkcji prezentuje rys. 3.

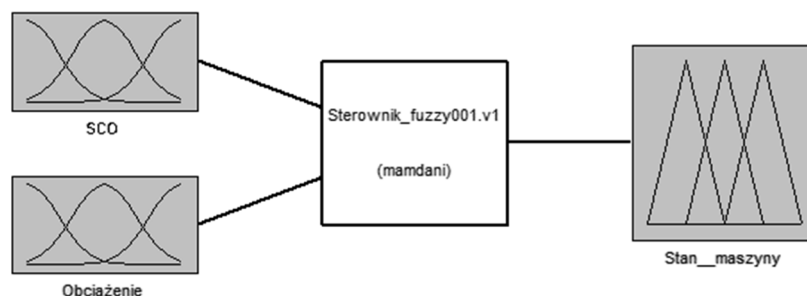


Rys. 3. Model systemu produkcyjnego zawierającego sterowanie rozmyte

W modelu, każda z obrabiarek ma podłączony swój własny moduł rozmyty, który odbiera dwa sygnały:

1. Średni czas oczekiwania (SCO).
2. Obciążenie.

Powyższe sygnały są przetwarzane przez sterownik w taki sposób, że na wyjściu generowany jest sygnał w postaci liczby rzeczywistej z przedziału $(0, 1)$. Rys. 4 prezentuje wejścia i wyjście sterownika.

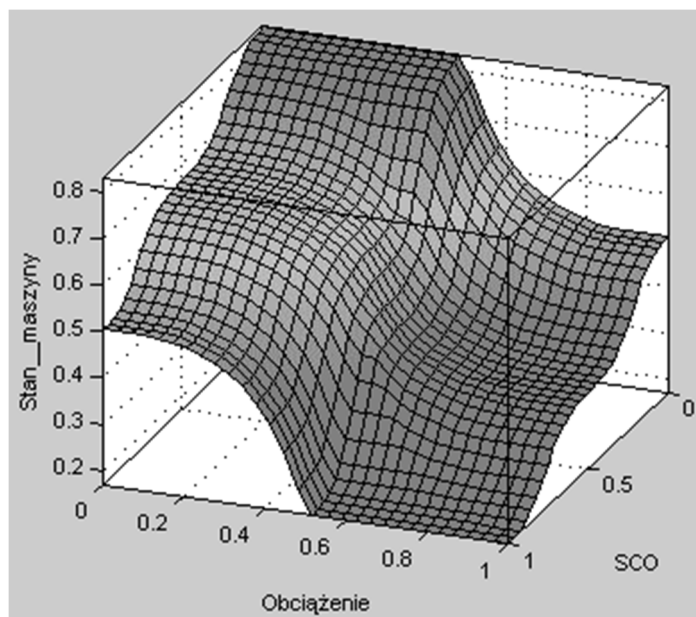


Rys. 4. Wejścia i wyjścia sterownika rozmytego

W sterowniku zastosowano trzy następujące reguły rozmywania:

1. Jeżeli **SCO** jest krótki lub **Obciążenie** jest niskie to **Stan maszyny** jest dobry
2. Jeżeli **SCO** jest średni to **Stan maszyny** jest średni
3. Jeżeli **SCO** jest długi lub **Obciążenie** jest wysokie to **Stan maszyny** jest słaby

Sposób działania sterownika rozmytego uwzględnia pogorszenie stanu maszyny w przypadku wzrostu jej obciążenia oraz w przypadku wydłużania średniego czasu oczekiwania części na obróbkę (parametr SCO). Powierzchnię odpowiedzi w zależności od wartości wejściowych prezentuje rys. 5.



Rys. 5. Powierzchnia odpowiedzi sterownika rozmytego

Z uwagi na trójkątny kształt funkcji przynależności parametru wyjściowego sterownika rozmytego, oraz na wybraną metodę środka masy, używaną w fazie wyostrażania, w rzeczywistości *Stan_maszyny* może uzyskać wartość minimalną 0,169 i maksymalną 0,831. Wartość minimalną sterownik uzyskuje gdy oba parametry wejściowe (SCO i Obciążenie)

uzyskują wartości równe jeden. Wartość maksymalną sterownika odnotowujemy gdy wartości wejść są równe zero. Nie istnieje jednoznaczna metoda doboru funkcji przynależności do poszczególnych danych wejściowych i wyjściowych. Dlatego, w trakcie opracowywania sterownika omawianego w niniejszej pracy, posłużono się metodą doświadczalną. Chodziło o to, by osiągnąć zamierzony cel zastosowania sterownika bez nadmiernego komplikowania procesu. Dlatego zastosowano jedynie trzy reguły rozmywania o stosunkowo prostym przebiegu.

Zastosowany sterownik rozmyty funkcjonuje na bazie modelu Mamdaniego [7, 8]. Oba parametry wejściowe (SCO i Obciążenie) muszą być najpierw sprowadzone do postaci liczbowej w taki sposób, aby wejścia zawsze zawierały się w przedziale $\langle 0 1 \rangle$. Problem ten został rozwiązany dzięki zastosowaniu przekształcenia wg następującego wzoru:

$$W_{ij} = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^N w_j} \quad (1)$$

gdzie:

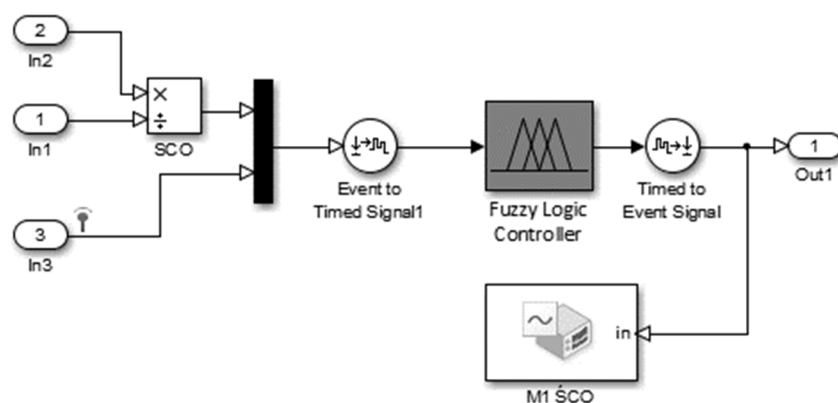
W_{ij} – wartość i -tego wejścia j -tego sterownika rozmytego, przekształcona w taki sposób, że zawsze mieści się w przedziale $\langle 0 1 \rangle$.

w_j – realna wartość parametru wejściowego sterownika rozmytego, pochodzącego od j -tej obrabiarki.

N – liczba obrabiarek.

Przekształcenie (1) realizuje fragment modelu zaprezentowanego na rys. 6. Jak widać, przekształcana do postaci $R \in \langle 0 1 \rangle$ jest tylko wartość wejściowa SCO. Jest tak dlatego, że wartość *Obciążenie* generowana przez moduł obrabiarki jest od razu wartością spełniającą warunek $Obciążenie \rightarrow R \in \langle 0 1 \rangle$.

Do rozmycia wejścia *SCO* zastosowano trzy funkcje przynależności o kształcie sigmoidalnym. Do rozmycia wejścia *Obciążenie* użyto dwóch funkcji przynależności o przebiegu trapezoidalnym. Do reprezentacji wyniku *Stan_maszyny* w fazie wyostrzania użyto trzech funkcji przynależności o kształcie trójkątnym. Reguły rozmywania zostały tak opracowane aby wysoka wartość parametru *Stan_maszyny* zwiększała szanse danej maszyny na jej wykorzystanie w kolejnym etapie obróbki. Wartości parametru wyjściowego *Stan_maszyny* są liczbą rzeczywistą zawierającą się w przedziale $R \in \langle 0 1 \rangle$.



Rys. 6. Umiejscowienie modułu sterownika rozmytego w ramach modelu wraz z przekształconymi parametrami wejściowymi

Czasy jednostkowe zostały w modelu przypisane do poszczególnych obrabiarek. W celu urealnienia przebiegu eksperymentu, czasy te zostały zróżnicowane losowo przy użyciu rozkładu dyskretnego jednostajnego, opisanego formułą (2):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{K} & \text{dla } x = L + k \frac{(U - L)}{K - 1}, k = 0, 1, 2, \dots, K - 1 \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

L – parametr minimalny (czas w sekundach),
 U – parametr maksymalny (czas w sekundach),
 K – liczba wartości parametru.

Parametry czasów jednostkowych przypisanych do poszczególnych obrabiarek za pośrednictwem stochastycznego rozkładu dyskretnego jednostajnego zaprezentowano w tabeli 1. Parametry L i U podane są w sekundach.

Tab. 1. Parametry czasów jednostkowych poszczególnych obrabiarek

Wyszczególnienie	Parametr L [s]	Parametr U [s]	Parametr K
Obrabiarka nr 1	240	340	2
Obrabiarka nr 2	120	270	2
Obrabiarka nr 3	60	400	2
Obrabiarka nr 4	270	300	2

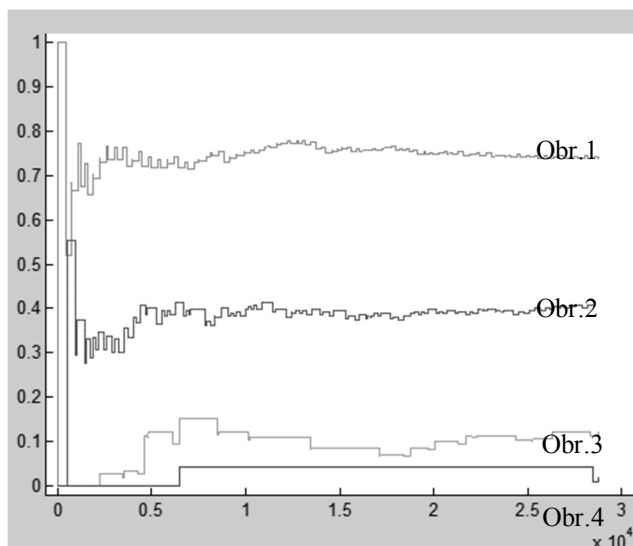
3. Analiza wyników eksperymentów symulacyjnych

Przeprowadzono dwa eksperymenty symulacyjne. Czas trwania eksperymentu symulacyjnego wynosił w obu przypadkach 28800 sekund, co odpowiada jednej ośmiogodzinnej zmianie roboczej.

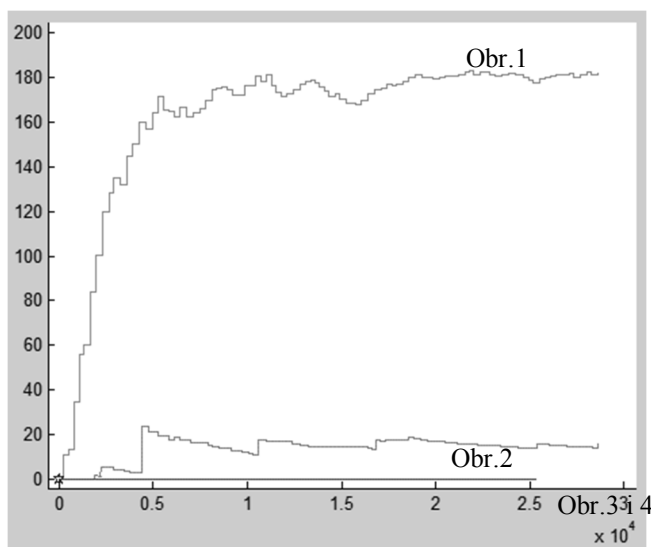
Oba eksperymenty dotyczyły modeli systemu produkcyjnego zawierającego cztery obrabiarki. W modelu pierwszym, do obrabiarek przydzielane były zadania produkcyjne na zasadzie pierwszej wolnej obrabiarki. Rys. 7 przedstawia wykresy obciążenia czterech obrabiarek sterowanych wg tej zasady. Na tym rysunku, podobnie jak na rys. 9, na osi poziomej zaznaczono czas symulacji w sekundach. Na osi pionowej znajduje się obciążenie obrabiarki pracą (wartość bez jednostki, która może być wyrażona w procentach). Wyraźnie widać, że obciążenia obrabiarek różnią się od siebie w sposób znaczący. Zwłaszcza różnice w obciążeniu między obrabiarką nr 1 i 4 są duże.

Należy się spodziewać, że obrabiarka nr 1 ulegnie zużyciu znacznie szybciej niż np. obrabiarka nr 4. Spowoduje to trudności w utrzymywaniu wysokich parametrów obróbki na obrabiarence nr 1. Kolejną obrabiarką, odnośnie której należy się spodziewać trudności w utrzymaniu parametrów związanych z precyzją obróbki jest maszyna nr 2. Najmniej obciążone są obrabiarki nr 3 i 4. Na uwagę zasługuje kształt wykresu obrabiarki nr 4. W odróżnieniu do pozostałych przebiegów, wykres charakteryzuje się małą zmiennością. Od rozpoczęcia zmiany roboczej, przez prawie dwie godziny obrabiarka nr 4 nie jest obciążona. Przez następne pięć i pół godziny obrabiarka jest obciążona na stałym, niskim poziomie

około 5%. Porównując stopień zmienności wykresów wszystkich czterech obrabiarek łatwo zaobserwować, że największą zmienność posiada wykres obrabiarki nr 1.



Rys. 7. Wykresy obciążenia czterech obrabiarek sterowanych wg zasady pierwszej wolnej obrabiarki



Rys. 8. Wykresy SCO czterech obrabiarek sterowanych wg zasady pierwszej wolnej obrabiarki

Rys. 8 przedstawia wykresy średnich czasów oczekiwania (SCO) części na obróbkę w magazynach buforowych poszczególnych obrabiarek. Na tym rysunku, podobnie jak na rys. 10, na osi poziomej zaznaczono czas symulacji w sekundach. Na osi pionowej znajduje się czas oczekiwania części na obróbkę, również wyrażony w sekundach. Parametr ten pośrednio

wskazuje na stopień wykorzystania danej obrabiarki. Im dłuższy czas oczekiwania, tym większa zajętość danej maszyny. Na rys. 8 widać, że najdłuższym czasem oczekiwania charakteryzuje się obrabiarka nr 1. W następnej kolejności, jednak znacznie poniżej wartości obrabiarki 1, znajduje się obrabiarka nr 2. Obrabiarki nr 3 i 4 charakteryzują się zerowym czasem oczekiwania, co oznacza że żadna część nie musiała czekać na obróbkę realizowaną przez te maszyny.

Po zapoznaniu się z przebiegami wykresów SCO na rys. 8 należy stwierdzić, że ilość zleceń produkcyjnych generowanych dla całego systemu produkcyjnego z pewnością nie przekracza jego możliwości produkcyjnych. W zasadzie, wystarczyłyby dwie obrabiarki aby zrealizować w całości zlecenia produkcyjne zaplanowane na jedną zmianę roboczą. Z tego powodu, jedynie obrabiarki nr 1 i 2 charakteryzują się dodatnim czasem oczekiwania części na obróbkę. Obrabiarki 3 i 4 podczas zmiany roboczej są minimalnie obciążone, o czym świadczy brak kolejki (zerowy czas SCO) części do obróbki na tych maszynach.

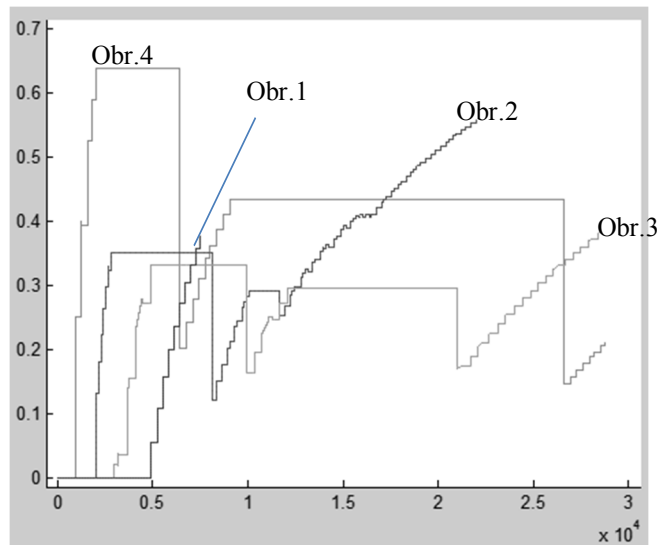
Należy jednak pamiętać, że w rozpartywanym przypadku priorytetem nie jest maksymalizacja wydajności produkcji lecz równomierne obciążenie wszystkich maszyn. Warunek ten nie został spełniony w przypadku posługiwania się sterowaniem wg zasady pierwszej wolnej obrabiarki.

W modelu drugim, każda obrabiarka wyposażona została w sterownik rozmyty, który w odstępach sekundowych, bada takie parametry jak *SCO* (średni czas oczekiwania części na obróbkę na danej maszynie) oraz *Obciążenie*. Przekształcając oba sygnały wejściowe, sterownik generuje parametr o nazwie *Stan_maszyny*. Został on tak skonstruowany, że im większa jest wartość parametru *Stan_maszyny*, tym większa jest szansa że dana maszyna zostanie obciążona zleceniem w następnej kolejności.

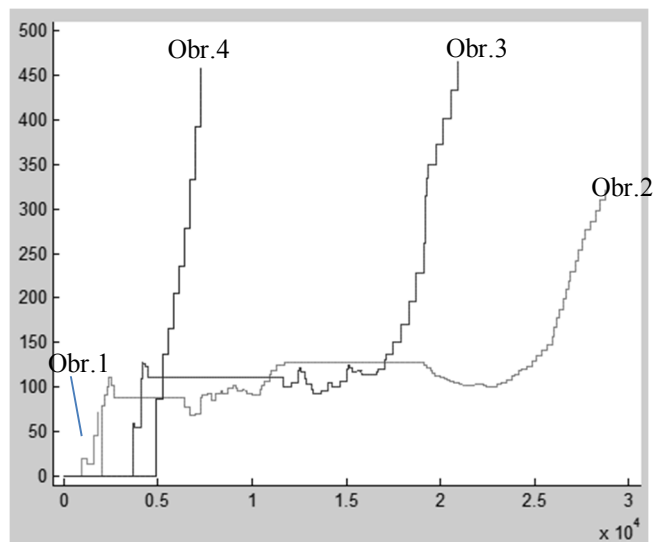
Dzięki zastosowaniu sterownika rozmytego przy każdej obrabiarce, podczas wprowadzania nowego zlecenia do produkcji, system porównuje wartości sygnału wygenerowanego przez każdą obrabiarkę i wybiera wartość największą. Zlecenie zostaje przydzielone do tej obrabiarki, która charakteryzuje się największą wartością parametru *Stan_maszyny*. Warto przy tym zauważyć, że w sytuacji, kiedy obrabiarka z najwyższą wartością parametru *Stan_maszyny* jest akurat zajęta pracą, zlecenie zostaje skierowane do kolejki, gdzie oczekuje na obróbkę. Nie jest więc kierowane np. do innej obrabiarki, która w danej chwili jest wolna. Sterownik nie zmienia przydziału części do maszyny z uwagi na jej chwilową zajętość.

Tak więc w tym wariantcie, dopuszczalne jest wydłużenie cyklu produkcyjnego (tym samym zmniejszenie wydajności systemu) w zamian za uzyskanie równomiernego obciążenia parku maszynowego.

Rys. 9 przedstawia wykresy obciążenia czterech obrabiarek funkcjonujących w systemie produkcyjnym, z wykorzystaniem sterownika rozmytego. W porównaniu z wykresami zaprezentowanymi na rys. 7, widać tu większą nieregularność. Ponadto, można zaobserwować, że na rys. 9 nie ma pojedynczej maszyny, która charakteryzowałaby się jednoznacznie największym lub najmniejszym obciążeniem. Przykładowo, obrabiarka nr 4 we wstępnej fazie zmiany roboczej osiągnęła znaczny poziom obciążenia, jednak w dalszej fazie obróbki poziom ten wyraźnie spadł. Następnie długo utrzymywał się na niezmiennym poziomie osiągając wartość około 0,45. Następnie poziom ten gwałtownie spadł poniżej 0,2, po czym zaczął rosnąć. Podobnie złożony charakter mają wykresy obciążenia innych obrabiarek. Świadczy to o prawidłowej pracy systemu rozmytego, który na bieżąco stara się zachować równomierne obciążenie wszystkich czterech obrabiarek uczestniczących w procesie produkcyjnym.



Rys. 9. Wykresy obciążenia czterech obrabiarek z wykorzystaniem sterownika rozmytego



Rys. 10. Wykresy SCO czterech obrabiarek z wykorzystaniem sterownika rozmytego

Rys. 10 przedstawia wykresy parametru SCO (średni czas oczekiwania) czterech obrabiarek funkcjonujących w systemie produkcyjnym, z wykorzystaniem sterownika rozmytego. Z powyższego rysunku wynika, że najkrótszym czasem oczekiwania części na obróbkę charakteryzuje się obrabiarka nr 1. Najdłużej oczekiwały części przeznaczone do obrabiarek 3 i 4.

Różnice wartości parametru SCO są stosunkowo duże, jednak są one i tak mniejsze niż w przypadku systemu produkcyjnego bez sterownika rozmytego, a ponadto czas oczekiwania

na obróbkę nie jest jednoznacznie skorelowany z obciążeniem obrabiarki, który to parametr był podstawowym celem zastosowania sterownika rozmytego.

Tab. 2. Porównanie wielkości produkcji dla obu modeli

Numer obrabiarki	Liczba wyprodukowanych części w modelu 1	%	Liczba wyprodukowanych części w modelu 2	%
1	70	45	5	3
2	69	45	82	57
3	14	9	48	33
4	1	1	10	7
RAZEM	154	100	145	100

W tabeli 2 zaprezentowano porównanie wielkości produkcji zrealizowanej podczas jednej zmiany roboczej przez poszczególne obrabiarki dla obu modeli. Jak widać, w przypadku modelu 1 (bez sterownika rozmytego) obrabiarki numer 3 i 4 były praktycznie niewykorzystywane. Kosztem uzyskania równomiernego obciążenia maszyn jest niższa zdolność produkcyjna systemu wytwórczego o 5,8%. Warto zauważyć, że różnice w ilości wyprodukowanych części przez poszczególne obrabiarki są rezultatem zróżnicowanych parametrów każdej z nich (patrz tabela 1).

4. Podsumowanie i wnioski

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie sterownika, który umożliwił równomierne obciążenie wszystkich obrabiarek wchodzących w skład systemu produkcyjnego. W tym celu opracowano dwa modele symulacyjne, z których pierwszy odzwierciedlał system produkcyjny, w którym zadania produkcyjne były rozdzielane na poszczególne obrabiarki metodą „pierwszej wolnej maszyny”. Drugi model systemu produkcyjnego wyposażono w sterowanie rozmyte, którego celem było takie przydzielanie zleceń produkcyjnych do obrabiarek aby w pierwszej kolejności zachowany był warunek równomiernego obciążenia maszyn. Do opracowania modeli wykorzystano środowisko symulacyjne Matlab i bibliotekę SimEvents [9].

W celu rozwiązania problemu badawczego opracowano inteligentny sterownik, którego zasada działania bazuje na modelu rozmytym Mamdaniego. Sterownik ten, w oparciu o dane wejściowe na temat czasu oczekiwania części do obróbki oraz obciążeniu maszyny, generował wartość wyjściową *Stan_maszyny*, która była interpretowana przez system jako poziom gotowości obrabiarki na przyjęcie kolejnego zlecenia. W przypadku pojawienia się nowej części do obróbki, system sprawdzał, która obrabiarka charakteryzowała się w danym momencie najwyższym współczynnikiem parametru *Stan_maszyny* i tę maszynę obciążał kolejnym zadaniem.

Wyniki eksperymentu potwierdziły skuteczność opracowanego sterownika. Tak jak można się było spodziewać, osiągnięcie równomiernego obciążenia maszyn zostało okupione zmniejszeniem wydajności systemu produkcyjnego, jednak nie jest to wartość znacząca. Bez zastosowania sterownika rozmytego, system wykazywał bardzo duże zróżnicowanie w obciążeniach poszczególnych obrabiarek, co z dużym prawdopodobieństwem (biorąc pod uwagę charakter produkcji) zaczęłoby powodować problemy z utrzymaniem powtarzalności wysokiej dokładności wymiarów obrabianych

części. Dzięki zastosowaniu rozwiązania opartego na sterowaniu rozmytym, problem został rozwiązany.

Literatura

1. Azadegan A., Porobic L., Ghazinoory S., Samouei P., Kheirkhah A. S., Fuzzy logic in manufacturing: A review of literature and a specialized application, *Int. J. Production Economics* 132 (2011) 258–270
2. Filev D., Syed F., Applied intelligent systems: blending fuzzy logic with conventional control. *International Journal of General Systems* 39 (4), 2010, 395–414.
3. Onut S., Kara S., Mert S., Selecting the suitable material handling equipment in the presence of vagueness. *International Journal of Advanced, Manufacturing Technology* 44 (7–8), 2009, 818–828.
4. Naumann A., Gu P., Real-time part dispatching within manufacturing cells using fuzzy logic. *Production Planning & Control* 8(7), 1997, 662–669.
5. Chan F., Chan H., Kazerooni A., Real time fuzzy scheduling rules in FMS. *Journal of Intelligent Manufacturing* 14 (3–4), 2003, 341–350.
6. Karakas E., Koyuncu M., Erol R., Fuzzy programming for optimal product mix decisions based on expanded ABC approach. *International Journal of Production Research* 48(3), 2010, 729–744.
7. Kłosowski G., Artificial intelligence techniques in cloud manufacturing, [w:] *Informatics methods as tools to solve industrial problems*, Bojanowska Agnieszka, Lipski Jerzy, Świć Antoni - Lublin: Politechnika Lubelska, 2012, s. 7-19
8. Nedjah N., de Macedo Mourelle L., *Fuzzy systems engineering*, Springer (2006)
9. Gola A., Sobaszek Ł., Simulation of production flow using Matlab system, [w:] *J.Lipski, A.Świć, Optimization of production processes*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin, (2013), s. 64-74.

Dr inż. Grzegorz KŁOSOWSKI
Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38 D
tel./fax: (0-81) 5384567
e-mail: g.klosowski@pollub.pl