

prof. dr hab. inż. Jerzy Honczarenko \*

dr inż. Mariusz Sosnowski \*\*

\* Politechnika Warszawska

\*\* Politechnika Szczecińska

## O MOŻLIWOŚCI DIAGNOZOWANIA USZKODZEŃ W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH WYTWARZANIA

*W referacie autorzy przedstawiają koncepcję, będącego w fazie budowy, układu nadzorowania i diagnostyki. Koncepcja układu polega na jednoczesnej pracy rzeczywistego systemu wytwarzania i jego modelu działającego w czasie rzeczywistym (on-line), a niesprawności identyfikuje się przez porównanie czasów realizacji elementarnych przemieszczeń i czynności wykonywanych przez wszystkie urządzenia. Jako obiekt do badań posłuży zminiaturyzowany elastyczny system wytwarzania zbudowany w Zakładzie Zautomatyzowanych Systemów Wytwarzania Politechniki Szczecińskiej. Do opracowania modelu komputerowego wykorzystane będzie oprogramowanie eM-Plant. Przedstawiono także plany inteligentnego układu diagnostycznego opartego o nowoczesne mikroprocesory z rdzeniem ARM.*

*Słowa kluczowe: monitoring, nadzór, detekcja uszkodzeń, oprogramowanie eM-Plant, mikroprocesorowy system diagnostyczny*

### ABOUT POSSIBILITY DIAGNOSING IN THE FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

*Below in paper authors proposes concept of supervision and diagnostics the system which already building. This conception rest on working real manufacturing system and working its modeling object at the same time, and next identification of damage through confrontation times of realization the same functions in both systems. In Department of Automated Manufacturing Systems was built the Miniature Flexible Manufacturing System which served as object of study. All will be prepare in eM-Plant. Authors propose also plans intelligent diagnostic system based on modern microprocessor with ARM's core.*

*Key words: monitoring, supervision, detection of damages, software eM-Plant, microprocessor diagnostic system.*

### 1. WPROWADZENIE

W okresie ostatnich kilku lat nastąpił znaczny wzrost automatyzacji procesów przemysłowych, co pociąga za sobą konieczność stosowania urządzeń nadzorujących i diagnostycznych. Do rozwoju diagnostyki technicznej przyczynia się rozwój elastycznych systemów wytwarzania (ESW), w których dla bezobsługowej pracy niezbędne staje się wprowadzenie układów nadzorująco-diagnostycznych, zastępujących operatora - człowieka. Powodem rozwoju układów nadzorująco-diagnostycznych są też znaczące korzyści ekonomiczne, wynikające z możliwości oceny stanu technicznego maszyn i narzędzi oraz wcześniejszego przygotowania się do naprawy, a także zapewnienie wyższej dokładności wytwarzanych przedmiotów.

Można wyróżnić trzy podstawowe zadania spełniane przez układy nadzorująco-diagnostyczne [3, 7]:

**Monitorowanie** (ang. *monitoring*) jest to śledzenie (obserwowanie) ilościowych i jakościowych zmian pewnych wielkości fizycznych dotyczących stanu maszyny (grupy maszyn) lub przebiegu procesu bez podejmowania jakichkolwiek decyzji czy reakcji.

**Nadzorowanie** (ang. *supervising*, niem. *Überwachung*) jest to zbieranie, przetwarzanie i przesyłanie ilościowych i jakościowych zmian pewnych wielkości fizycznych zawierających informacje o cechach obiektów technicznych lub przebiegu procesu w celu wykrywania stanów wymagających interwencji, a następnie oddziaływanie w celu uzyskania pożądanego stanu lub w celu uzyskania stanu charakteryzującego się minimalizacją skutków (uszkodzeń). Nadzorowanie mieści się więc w kategoriach sterowania.

**Diagnozowanie** to wykrywanie nieprawidłowości (diagnostyka awaryjna) lub zwiększonego prawdopodobieństwa wystąpienia nieprawidłowości (diagnostyka prewencyjna) w działaniu urządzenia lub przebiegu procesu. Układ diagnostyczny określa przyczynę i miejsce (źródło) nieprawidłowości. Wyniki uzyskane w procesie diagnozowania wspomagają decyzje dotyczące dalszego użytkowania maszyny (np. korekta ustawień i parametrów pracy, bieżąca naprawa, remont czy konserwacja). Diagnozowanie może mieć zastosowanie w każdej fazie istnienia obiektu.

Wczesne wykrycie i zlokalizowanie usterki w złożonych systemach pozwala na uniknięcie niepożądanych blokad, zaoszczędzenie czasu i środków finansowych. Duża liczba sygnałów sterujących i zwrotnych pochodzących uzasadnia pytanie: „Czy sprawdzać wszystkie sygnały kosztem czasu czy może kontrolować wyrywkowo, ale dokładnie?” Doświadczenia ostatnich lat pokazują bowiem, że systemy sterowania i wizualizacji gwałtownie zwiększają zapotrzebowanie na ilość danych. Wzrost liczby danych nie jest związany bezpośrednio ze sterowaniem procesem technologicznym, a ze zwiększeniem zapotrzebowania na informacje diagnostyczne, niezbędne do kontroli poprawności pracy urządzeń wykonawczych. Dlatego szukanie nowych metod i algorytmów działania podsystemu diagnostycznego w postaci układu monitorującego i nadzorującego jest celowe.

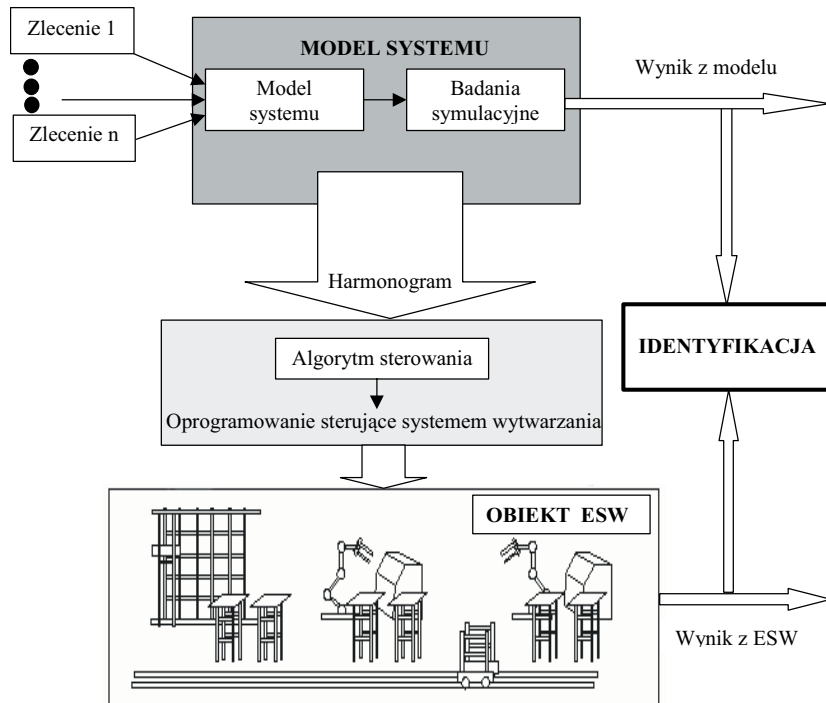
W referacie Autorzy przedstawiają koncepcję, będącego w fazie budowy, układu nadzorowania i diagnostyki. Koncepcja układu polega na jednoczesnej pracy rzeczywistego systemu wytwarzania i jego modelu działającego w czasie rzeczywistym (on-line), a niesprawności identyfikuje się przez porównanie czasów realizacji elementarnych przemieszczeń i czynności wykonywanych przez wszystkie urządzenia. Jako obiekt do badań posłuży zminiaturyzowany elastyczny system wytwarzania zbudowany w Zakładzie Zautomatyzowanych Systemów Wytwarzania Politechniki Szczecińskiej.

W dalszej przyszłości planuje się zaprojektowanie i wykonanie inteligentnych układów diagnostycznych opartych o nowoczesne mikroprocesory z rdzeniem ARM, które będą mogły funkcjonować w dowolnie skonfigurowanych podsystemach wytwarzania.

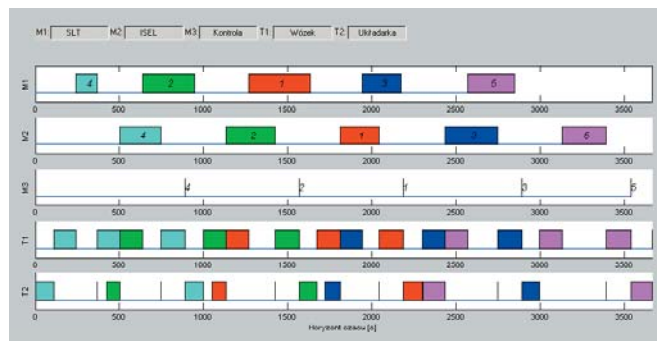
## 2. IDEA DIAGNOSTYKI

Idea badań diagnostycznych ESW będzie oparta na układzie automatyki realizującym funkcje diagnostyczne – rys. 1. Nadzorowanie i diagnostyka polegać będzie na jednoczesnej pracy rzeczywistego systemu wytwarzania i jego modelu działającego w czasie rzeczywistym (on-line) i identyfikacji czasów realizacji elementarnych przemieszczeń i czynności wykonywanych przez wszystkie urządzenia. Zlecenia napływające z zewnątrz są podawane do komputera, w którym w oprogramowaniu symulacyjnym eM-Plant (blok *MODEL SYSTEMU*) utworzono model systemu. W procesie symulacji generowany jest harmonogram działania systemu, który jest przesyłany do centralnego oprogramowania sterującego pracą rzeczywistego

ESW (blok *OBIEKT ESW*), będą jednocześnie W bloku *IDENTYFIKACJA* porównywane będą wyniki, a konkretnie czasy działania obiektu - tzn. czasy realizacji poszczególnych przemieszczeń, manipulacji, maszynowe - z czasami pracy modelu otrzymanymi na drodze symulacji komputerowych w postaci wykresów Gantta – rys.2.



Rys. 1. Struktura blokowa układu nadzorująco-diagnostycznego

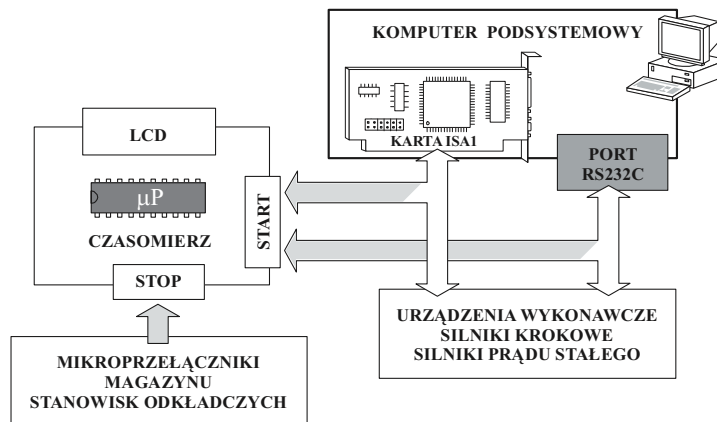


Rys. 2. Przykład wykresu Gantta

Podczas poprawnej pracy ESW różnica czasów będzie poniżej założonego arbitralnie poziomu, natomiast w przypadku wystąpienia uszkodzenia czy awarii w kontrolowanej części rzeczywistego obiektu wartość różnicy będzie większa. Pozwoli to na wskazanie miejsca wystąpienia awarii lub blokady w badanym obiekcie.

Warunkiem prawidłowego działania tak zbudowanego układu nadzorująco-diagnostycznego jest zgodność modelu z obiektem rzeczywistym. W celu weryfikacji dla każdego elementarnego zadania w rzeczywistym systemie muszą zostać zmierzone czasy realizacji poszczególnych przemieszczeń, czynności manipulacyjnych i czasy maszynowe (obróbki), które następnie zostaną wprowadzone do oprogramowania eM-Plant. Czasy realizacji elementarnych

przemieszczeń i czynności mierzone będą na rzeczywistym MSW za pomocą zaprojektowanego i wykonanego czasomierza mikroprocesorowego  $\mu\text{P}$ , którego zasadę działania przedstawia rys. 3 [8].



Rys. 3. Czasomierz  $\mu\text{P}$  do pomiarów czasów w ESW [8]

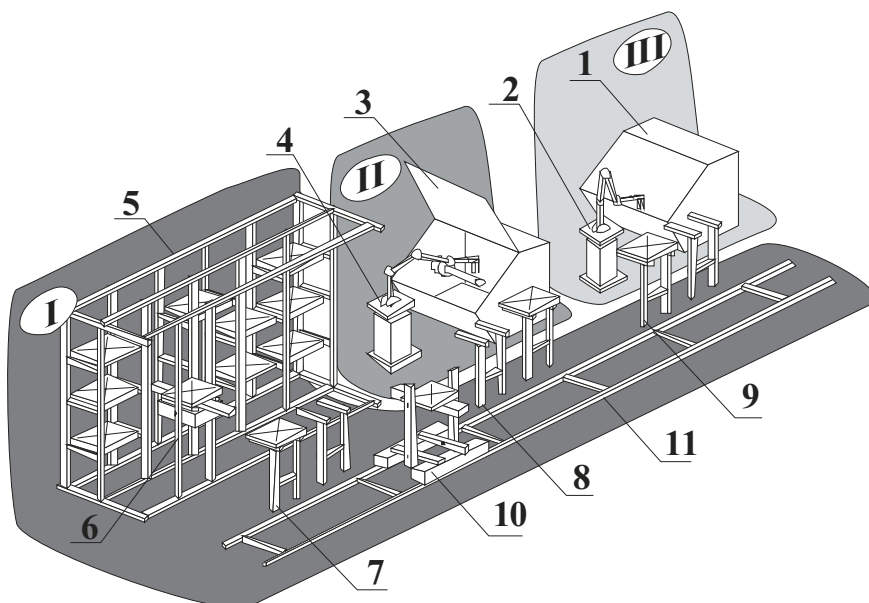
Zbudowany czasomierz posłuży również do kontroli elementarnych czasów przemieszczeń i czynności w rzeczywistym systemie. Czasomierz mikroprocesorowy  $\mu\text{P}$  został tak zaprojektowany aby umożliwiał pomiar zarówno sygnałów analogowych jak i cyfrowych, które sterują urządzeniami wykonawczymi w dowolnej konfiguracji elastycznych systemów wytwarzania.

### 3. OBIEKT BADAŃ

W Zakładzie Zautomatyzowanych Systemów Wytwarzania zaprojektowano i zbudowano miniaturowy elastyczny system wytwarzania (MESW), co przedstawiono na rys. 4.

System jest miniaturą rzeczywistych systemów obróbkowych stosowanych w przemyśle o strukturze funkcjonalnej takiej jak rzeczywiste systemy przemysłowe. Zawiera obrabiarki, urządzenia magazynowe, transportowe i manipulacyjne, stosowane i powiązane ze sobą jak w rzeczywistych systemach przemysłowych. System odzwierciedla zachodzące w rzeczywistości różne procesy obróbki i przepływu palet z przedmiotami oraz umożliwia przeprowadzanie doświadczalnych weryfikacji różnych metod harmonogramowania, sterowania i diagnozowania produkcji. Modułowa budowa MESW pozwala na swobodną rozbudowę, modyfikację oraz integrowanie każdego urządzenia systemu z resztą układu. Dlatego w systemie zastosowano 3 podsystemy składowe: podsystem magazynowo – transportowy (I), podsystem technologiczny tokarski (II) i frezarski (III).

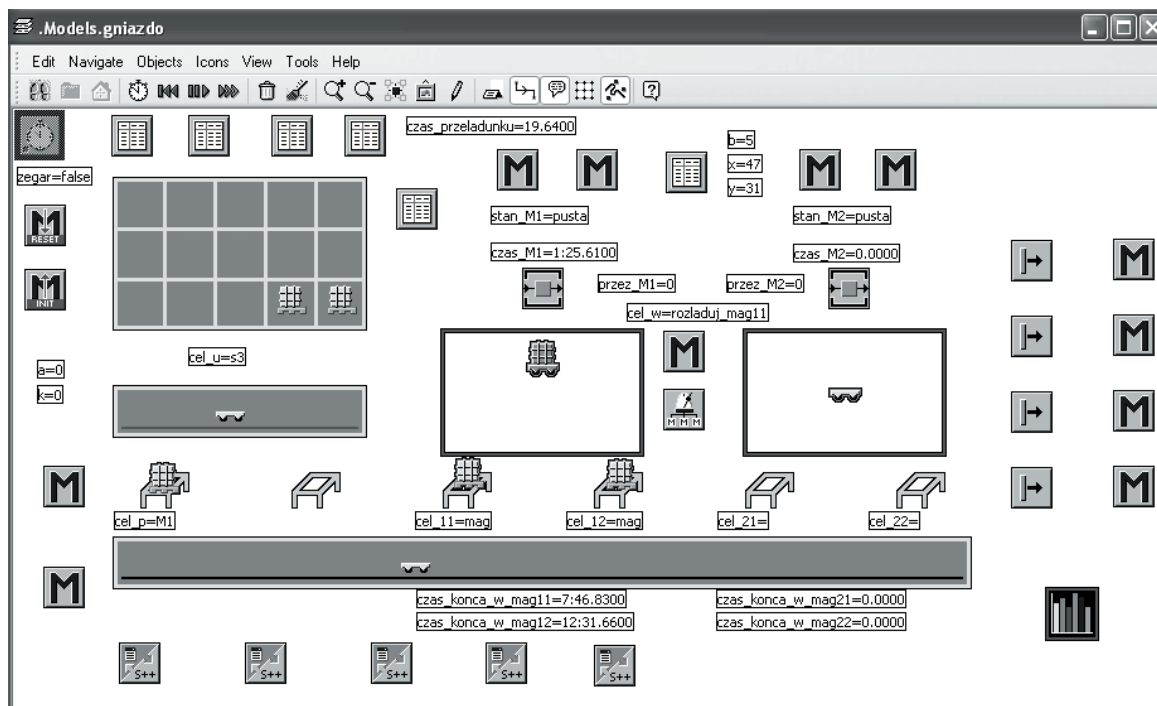
Szczegółowa budowa oraz sterowanie z wykorzystaniem klasycznych metod i metod leżących w obszarze sztucznej inteligencji był tematem wielu publikacji [4, 6, 8]. Urządzenia wchodzące w skład wszystkich podsystemów sterowane są za pomocą komputerów PC połączonych ze sobą siecią przemysłową.



**Rys. 4.** Konfiguracja miniaturowego elastycznego systemu wytwarzania: 1) frezarka, 2) robot frezarki, 3) tokarka, 4) robot tokarki, 5) magazyn regałowy, 6) układarka, 7) stanowiska odkładcze układarki regałowej, 8) stanowiska odkładcze tokarki, 9) stanowiska odkładcze frezarki, 10) wózek transportowy, 11) tor jezdny [1]

#### 4. MODEL SYSTEMU

Model miniaturowego rzeczywistego systemu opracowano w programie eM-Plant, co pokazano na rys. 5 [6].



**Rys. 5.** Zamodelowany MESW w oprogramowaniu symulacyjnym eM-Plant [6]

Do sterowania zamodelowanymi obiektami w programie można posłużyć się heurystycznymi regułami decyzyjnymi oraz logiką rozmytą. Te same reguły decyzyjne wykorzystane do sterowania MESW. W programie zaimplementowano urządzenia i obrabiarki oraz czasy przejazdów układarki, wózka, robota oraz wprowadzono rzeczywiste czasy obróbkowe.

Oprogramowanie symulacyjne oprócz pełnej przejrzystości i wizualizacji obiektów ma również odpowiednią bibliotekę, która umożliwia sterowanie i kontrolę urządzeń na zewnątrz oprogramowania (rzeczywiste urządzenie podłączone do komputera poprzez odpowiedni interfejs komunikacyjny może być sterowane z pozycji zainstalowanego oprogramowania eM-Plant). Czas działania wszystkich zdarzeń w oprogramowaniu symulacyjnym odbywać się może ze zmienną prędkością (szybsze działanie modelu pozwoli na wcześniejsze wykrycie nieprawidłowości w badanym obiekcie) jak również w czasie rzeczywistym.

Jak już wspomniano, warunkiem prawidłowego działania tak zbudowanego układu nadzorująco-diagnostycznego jest zgodność modelu z obiektem rzeczywistym. W obecnej fazie zaawansowania budowy układu nadzorująco-diagnostycznego zweryfikowano model MESW zbudowany w programie eM-Plant sterowany z wykorzystaniem reguł (FIFO) i logiki rozmytej (FL). Badania przeprowadzono dla zdefiniowanych zleceń produkcyjnych (liczba przedmiotów przeznaczonych do obróbki, czas trwania operacji obróbkowych oraz marszruty technologiczne). Do badań przyjęto zestaw produkcyjnych wraz z czasami obróbkowymi. Dane do eksperymentu zestawiono w tabelach 1 i 2 [4, 8].

**Tab. 1.** Czasy maszynowe (obróbki) dla obrabiarek M1 i M2

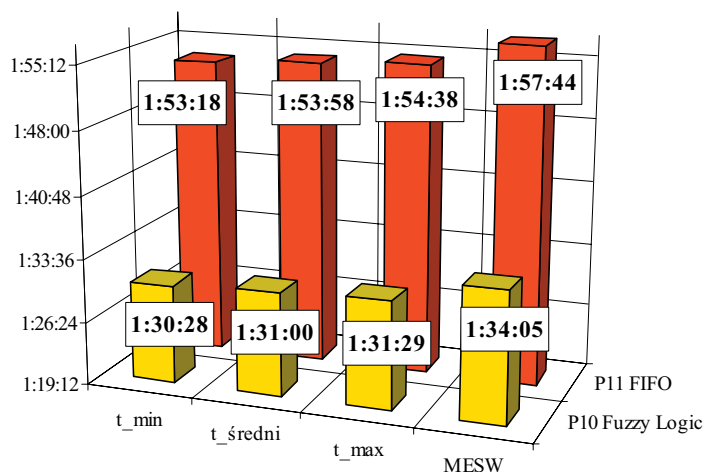
	<b>Tokarka M1</b> [s]	<b>Frezarka M2</b> [s]
Zlecenie Z1	128,55	81,28
Zlecenie Z2	100,53	121,03
Zlecenie Z3	70,96	65,31
Zlecenie Z4	81,04	180,51
Zlecenie Z5	200,43	30,38
Zlecenie Z6	70,96	30,38
Zlecenie Z7	200,43	180,51
Zlecenie Z8	128,55	
Zlecenie Z9	100,53	
Zlecenie Z10	70,96	
Zlecenie Z11	81,04	
Zlecenie Z12	200,43	
Zlecenie Z13		180,51
Zlecenie Z14		30,38

**Tab. 2.** Zlecenia przyjęte do badań

Przykłady	Badanie	Liczba palet/ przedmiotów	Marszruta technologiczna	Zlecenia przypisane paletom
P10	Sterowanie FL	15/3	MT1, MT2, MT3, MT4	Z6, Z14, Z14, Z14, Z14, Z10, Z10, Z6, Z6, Z6, Z6, Z6, Z6, Z10, Z10
P11	Sterowanie FIFO			

Wyniki weryfikacji modelu w stosunku do obiektu MESW sterowanego z harmonogramu działającego wg reguł FIFO i wnioskowania rozmytego FL pokazano na rys. 6 [8]. Względny

błąd czasu realizacji badanego zestawu zleceń w modelu w stosunku do czasu realizacji tego samego zestawu zleceń w obiekcie rzeczywistym nie przekracza 4 %, co świadczy o przydatności modelu do identyfikacji zdarzeń w rzeczywistym systemie.



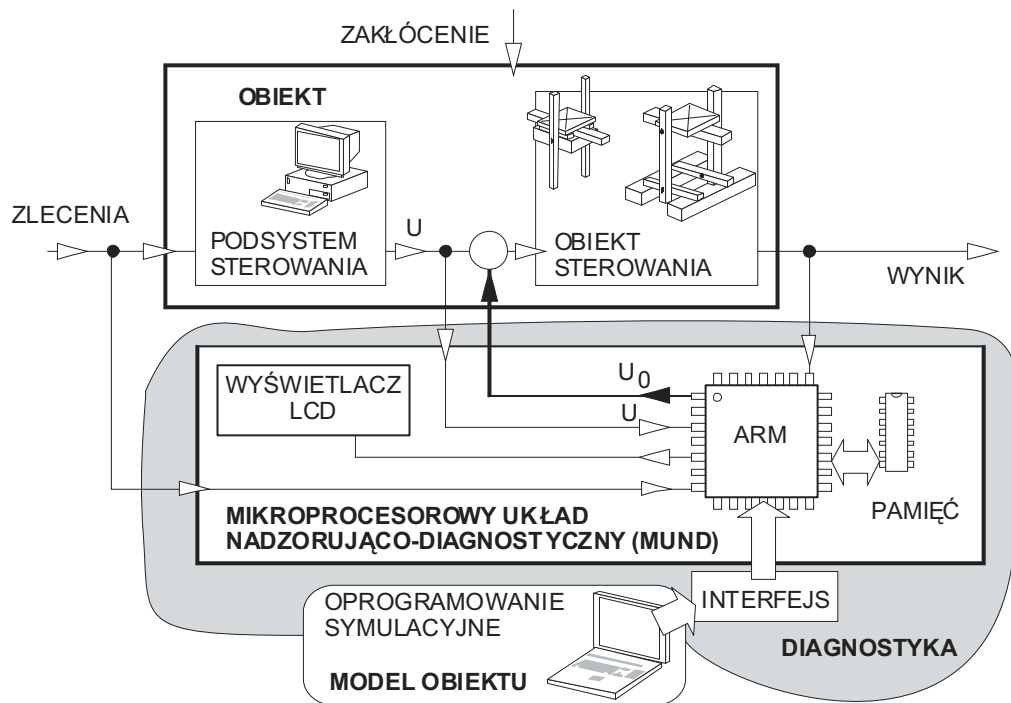
**Rys. 6.** Wyniki weryfikacji modelu utworzonego w programie eM-Plant działającego wg reguł FIFO i reguł rozmytych FL:  $t_{\min}$ ,  $t_{\text{śr}}$  i  $t_{\max}$  – zmierzone minimalne, średnie i maksymalne czasy przemieszczeń układarki i wózka w rzeczywistym systemie [4, 8]

## 5. KONCEPCJA INTELIGENTNEGO MIKROPROCESOROWEGO UKŁADU NADZORUJĄCO-DIAGNOSTYCZNEGO

Po przeprowadzeniu badań i potwierdzeniu słuszności przedstawionej koncepcji układu nadzorująco-diagnostycznego, kolejnym krokiem będzie jego wdrożenie. Opracowywany model obiektu w oprogramowaniu symulacyjnym eM-Plant zostanie przekompilowany i przesłany za pomocą interfejsu do bloku mikroprocesorowego układu diagnostycznego (MUND). Po czym komputer symulacyjny, w którym zapisany jest model obiektu będzie odłączony od reszty układu diagnostycznego, ponieważ kontrolę nad systemem w tym momencie przejmie MUND.

Blok MUND będzie wyposażony w szereg złącz do/z których będą wysyłane/pobierane sygnały sterujące. Na rys. 7 przedstawiono poglądowo schemat blokowy układu, przy czym sygnały oznaczone jako  $u$  (sygnał sterujący) i  $u_0$  (sygnał regulacyjny) będą odgrywać rolę nadzorcą potrzebną do rozpoznawania nieprawidłowości zachowań oraz podejmowania czynności dla utrzymania właściwego działania podsystemu magazynowo-transportowego.

Pozostałe sygnały diagnostyczne oraz liczba tych sygnałów będzie uzależniona wielkością monitorowanego obiektu. Blok MUND będzie miał również pamięć, gdzie zapisywane będą wszystkie błędy i nieprawidłowości w działaniu systemu, jak również czas realizacji poszczególnych elementarnych przemieszczeń urządzeń wykonawczych. Podgląd rodzajów błędów, zakłóceń i nieprawidłowości w działaniu będą wyświetlane na wyświetlaczu LCD, który oprócz błędów będzie wskazywać on-line aktualnie wykonywane czynności i programy. Zakłóceniami w podsystemie magazynowo-transportowym będą sztucznie wywoływane usterki tj.: brak sygnału sterującego silnikiem, wydłużenie czasu działania wózka transportowego czy awaria łączników sygnalizacyjnych obecność palet na regale.

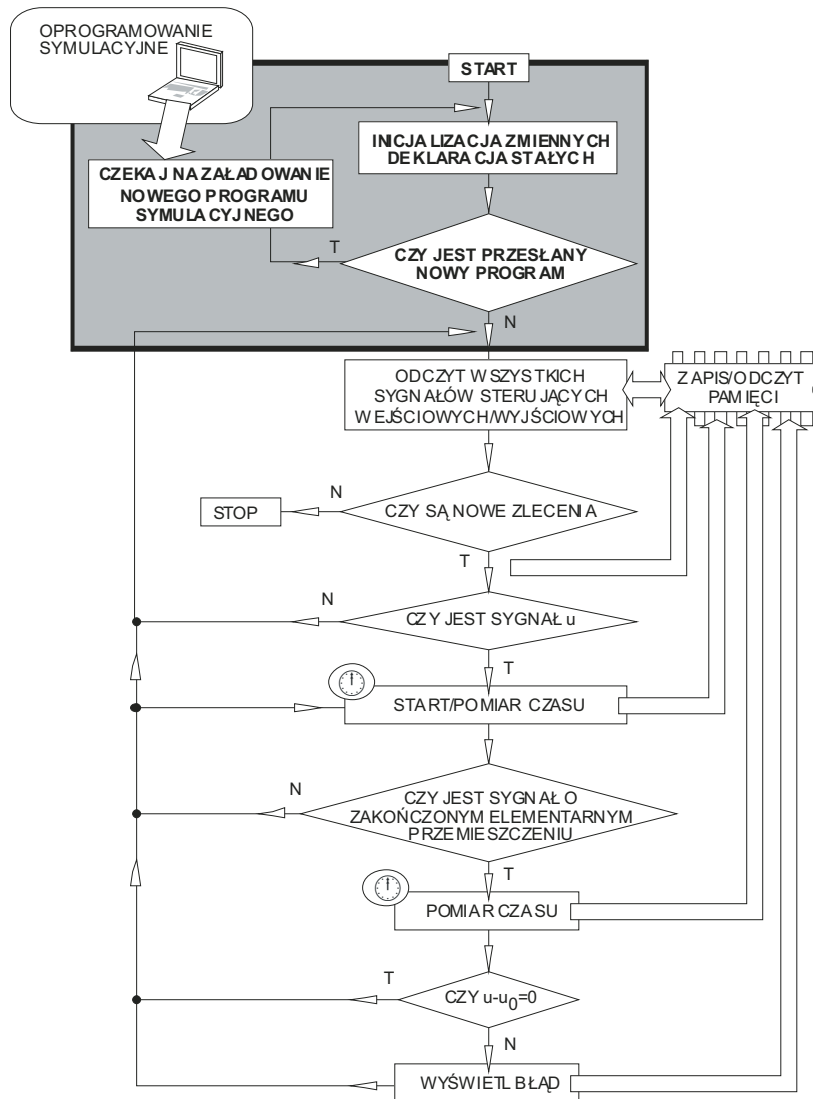


Rys. 7. Mikroprocesorowy układ nadzorująco-diagnostyczny

Sercem inteligentnego układu nadzorująco-diagnostycznego będzie 32-bitowy mikroprocesor z rdzeniem ARM7TDMI firmy Philips. Mikroprocesory te charakteryzują się bardzo małym poborem mocy, a ich rdzenie mogą być taktowane zegarem o częstotliwości 75MHz. Wyposażone są we wszystkie typowe interfejsy komunikacyjne (FIFO dla obydwóch kierunków transmisji, USB, CAN, LAN, itd.), przetworniki A/C i C/A, system szybkiego odczytu pamięci oraz portów I/O [2]. Tak wygórowane parametry mikroprocesora pozwolą na pracę z dużą ilością informacji, które będą musiały być poddane obróbce matematycznej potrzebnej do prawidłowego monitoringu i nadzoru podsystemu magazynowo-transportowego. Dzięki małemu poborowi energii, zbudowany MUND będzie mógł mieścić się w dłoni i będzie zasilany bateryjnie.

Nad poprawnością działania MUND będzie czuwał zaprogramowany mikroprocesor według przedstawionego fragmentarycznie diagramu sterującego jak na rys. 8. Do kompilacji i zaprogramowania poniższego algorytmu w mikroprocesorze użyty będzie język wyższego rzędu np. Keil ARM.

Wyłuszczonego blokiem oznaczono fragment diagramu sterującego mikroprocesorem odpowiedzialnym za wczytanie z oprogramowania symulacyjnego nowego modelu obiektu. Po wczytaniu nowego programu oraz właściwych danych sterujących, mikroprocesor przechodzi w stan pracy tzn. odczytuje/zapisuje potrzebne informacje z/do pamięci zewnętrznej. Program sprawdza szereg warunków związanych z np. pojawieniem się nowych sygnałów sterujących czy zakończonym elementarnym procesie przemieszczenia układarki i/lub wózka. W przypadku braku nowych zleceń algorytm pracy zostaje zakończony.



Rys. 8. Algorytm sterowania mikroprocesorem

Tak opracowany algorytm sterujący pozwoliłoby na monitorowanie i nadzorowanie dowolnych podsystemów sterowania z możliwością szybkiego przeprogramowania MUND na potrzeby badanego podsystemu. Jednak aby taką tezę udowodnić należy nie tylko przeprowadzić badania na elastycznym systemie wytwarzania, ale również wykonać badania diagnostyczne podczas pracy innych zautomatyzowanych podsystemów wytwórczych.

## 6. PODSUMOWANIE

Idea badań diagnostycznych ESW będzie oparta na układzie automatyki realizującym funkcje diagnostyczne i polegać będzie na jednoczesnej pracy rzeczywistego systemu wytwarzania i jego modelu działającego w czasie rzeczywistym (on-line), a niesprawności identyfikuje się przez porównanie czasów realizacji elementarnych przemieszczeń i czynności. Dla zrealizowania tak pomyślanej idei i zbudowania układu nadzorująco-diagnostycznego wydaje się koniecznym:

1. Utworzenie zweryfikowanego modelu systemu wytwarzania zapewniającego zgodność wyników symulacji z obiektem rzeczywistym. W obecnej fazie zaawansowania budowy

- zweryfikowano model MESW zbudowany w programie eM-Plant sterowany z wykorzystaniem reguł FIFO i logiki rozmytej, dla którego względny błąd czasów realizacji zleceń produkcyjnych nie przekracza 4%.
2. Zastosowanie układu mierzącego czasy realizacji poszczególnych przemieszczeń, czynności manipulacyjnych i czasy maszynowe (obróbki) w obiekcie rzeczywistym. Obecnie czasy można mierzyć za pomocą zaprojektowanego i wykonanego czasomierza mikroprocesorowego.
  3. Przeprowadzenie badań doświadczalnych na kilku obiektach z wprowadzaniem różnych niesprawności w celu zweryfikowania słuszności zaprezentowanej idei i stwierdzenia ile i jakich sygnałów sterujących i procesowych potrzebuje układ diagnostyczny dla prawidłowego i szybkiego zlokalizowania usterki. Wyniki z przeprowadzonych badań pozwolą na stwierdzenie uniwersalności i przydatności metody.
  4. Skonstruowanie inteligentnego układu nadzorująco-diagnostycznego MUND na bazie techniki mikroprocesorowej, który ułatwi zaimplementowanie programu symulacyjnego działającego równoległe z rzeczywistym systemem.

## LITERATURA

- [1] *Badawczy system elastycznego inteligentnego wytwarzania*. Raport z realizacji projektu badawczego nr 8 T07D 00420Szczecin 2003 (nie publikowany).
- [2] Bryndza L., *LPC2000 Mikrokontrolery z rdzeniem ARM7*, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2007.
- [3] Honczarenko J., *Elastyczna automatyzacja wytwarzania. Obrabiarki i systemy obróbkowe*. WNT, Warszawa 2000.
- [4] Honczarenko J., Sosnowski M.: *O możliwości wykorzystania logiki rozmytej do sterowania elastycznym systemem wytwarzania*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Automatyzacja – nowości i perspektywy AUTOMATION 2005”, Warszawa 6-8 kwiecień 2005, s. 86-95.
- [5] Honczarenko J., Sosnowski M., *Zastosowanie modułów mikroprocesorowych do sterowania badawczym elastycznym systemem wytwarzania*, POSTĘPY ROBOTYKI, tom 2, praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Tchonia, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005, s. 87-94.
- [6] Jałowicki S., *Zadaniowe sterowanie zrobotyzowanym systemem wytwarzania z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2003 (nie publikowana).
- [7] Kościelny J., M., *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [8] Sosnowski M., *Doświadczalna weryfikacja wybranych metod sterowania elastycznymi systemami wytwarzania*. Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2006 (nie publikowana).