

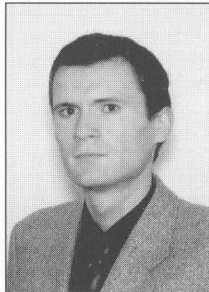
**Grzegorz DEC, Zbigniew HAJDUK, Dariusz ZAKORCZMENNY**

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA INFORMATYKI I AUTOMATYKI

**Model do sterowania linią produkcyjną procesu kucia na gorąco.****Mgr inż. Grzegorz DEC**

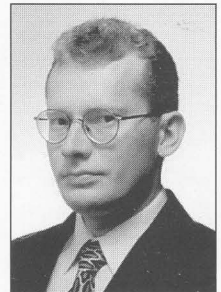
Studia ukończył na wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej w roku 1998. Obecnie pracuje jako asystent w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zainteresowania zawodowe obejmują zastosowanie układów scalonych w procesach sterowania logicznego.

gdec@prz-rzeszow.pl

**Mgr inż. Zbigniew HAJDUK**

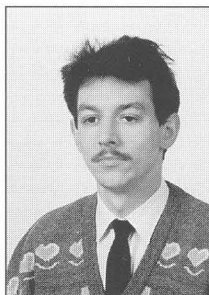
Studia ukończył na wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej w roku 1998. Obecnie pracuje jako asystent w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zainteresowania zawodowe obejmują zastosowanie układów scalonych w procesach sterowania logicznego.

zhajduk@prz-rzeszow.pl

**Mgr inż. Dariusz ZAKORCZMENNY**

Studia ukończył na wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej w roku 1995. Obecnie pracuje jako asystent w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zainteresowania zawodowe obejmują sterowniki PLC i systemy wizualizacji.

darzak@prz-rzeszow.pl

**Streszczenie**

W artykule omówiono budowę linii produkcyjnej modelującej proces kucia na gorąco oraz przedstawiono sposób sterowania obiektem. Algorytm sterowania opisany został za pomocą sieci Petriego i zaimplementowany na sterowniku logicznym. Przedstawiono aplikację wizualizacji wykonaną w pakiecie oprogramowania WinCC, która umożliwia monitorowanie przebiegu procesów modelowanych przez obiekt.

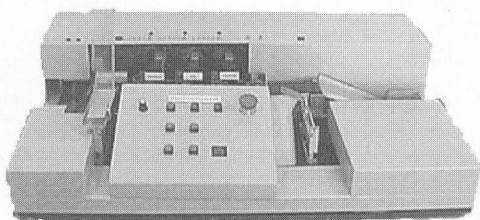
**Abstract**

This paper describes the construction of a production line modeling process of hot-forging as well as presents the way of controlling the object. Control algorithm is described by a Petri net and implemented in a programmable logic controller. A visualization made with software tool WinCC is presented which allows monitoring of processes modeled by the object.

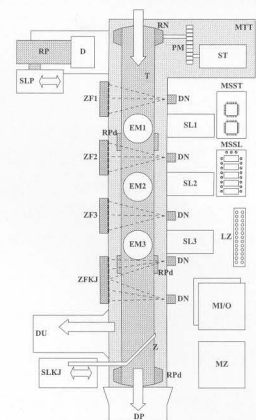
Obiekt został opracowany i wykonany w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej w celu prowadzenia badań nad programowymi i sprzętowymi systemami współbieżnego sterowania. Modelowany proces kucia na gorąco złożony jest z kilku powiązanych ze sobą podprocesów, do sterowania których użyte zostały sieci Petriego. Teoria sieci Petriego [1,6] odgrywa ważną rolę w zadaniach projektowania i eksploatacji systemów informatycznych, projektowania i programowania sterowników, monitorowania pracy urządzeń i innych.

**1. Budowa obiektu**

Model taśmy produkcyjnej umieszczony jest w obudowie metalowej wykonanej z blachy stalowej (rys. 1).



Rys. 1. Model linii produkcyjnej



Rys. 2. Schemat obiektu

Jako podstawę modelu wykorzystano płytę z pleksi. Na płycie rozmieszczone są poszczególne części składowe obiektu (rys. 2) tj.:

- moduł taśmy transportowej (MTT),
- podajnik elementów (SLP, RP, D),
- stanowisko nagrzewania (SL1, EM1, ZF1, DN),
- stanowisko kucia (SL2, EM2, ZF2, DN),
- stanowisko hartowania (SL3, EM3, ZF3, DN),
- stanowisko kontroli jakości z odbiorem złych elementów (SLKJ, DU),
- stanowisko odbioru dobrych elementów (DP),
- moduł zasilacza (MZ),
- moduł sterowania silnikami liniowymi (MSSL),
- moduły obsługi wejść i wyjść (MI/O),
- moduł sterowania silnikiem taśmy (MSST),
- listwy zaciskowe (LZ).

**1.1 Moduł taśmy transportowej**

W skład modułu taśmy transportowej wchodzi:

- silnik napędowy prądu stałego ST,
- przekładnia mechaniczna zębata ze sprzęgłem ciernym dwukierunkowym PM,
- rolka napędowa RN i rolki podtrzymujące RPd,
- zespoły fotokomórek ZF1...ZF3, ZFKJ,
- taśma nośna T,
- fotoelektryczny miernik prędkości taśmy.

Jako element napędzający taśmę wykorzystano silniczek miniaturowy prądu stałego. Zwiększenie momentu obrotowego uzyskano poprzez zastosowanie przekładni zębatej. Dwukierunkowe sprzęgło cierne zabezpiecza silnik przed dużymi przeciążeniami. Sprzęgło jest zablokowane z rolką napędową, która bezpośrednio napędza taśmę. Dwie skrajne rolki posiadają lekko beczkowaty kształt, który zapewnia równe prowadzenie taśmy transportowej.

**1.2 Podajnik elementów**

Podajnik elementów (klocków) zbudowany jest na bazie silnika liniowego (SLP), wyposażonego w elementy ustalające i podające klocki (D) na taśmę. Nad całością umieszczono zasobnik z klocka-

mi opadającymi grawitacyjnie przed ramię podajnika (RP) po wrocie silnika w stan spoczynkowy. Płytką ustalającą umieszczona na module taśmy transportowej zapewnia zatrzymanie podawanego klocka i jego odpowiednie ustawienie względem taśmy.

Stan, w jakim znajduje się podajnik sygnalizuje dwukolorowa dioda LED umieszczona na obudowie. Kolor zielony wskazuje stan spoczynkowy, w trakcie podawania elementu zmienia barwę na czerwoną.

Do imitacji materiału produkcyjnego zastosowano prostopadłocienne klocki o różnej długości z płytką metalową na powierzchni.

### 1.3 Stanowiska nagrzewania, kucia i hartowania

Wszystkie trzy stanowiska robocze są bliźniacze i składają się z silnika liniowego (SL1, SL2, SL3), elektromagnesu (EM1, EM2, EM3) o napięciu roboczym 24 V, zespołu fotokomórek (ZF1, ZF2, ZF3) i diod nadawczych (DN).

Zadaniem zespołów fotokomórek jest dostarczenie informacji o położeniu elementu przed stanowiskiem. Zespoły nadawcze i odbiorcze zostały umieszczone na specjalnie wyprofilowanych płytkach laminowanych.

Elektromagnes, który jest zamontowany na silniku liniowym ma za zadanie podnieść kłoczek ponad poziom taśmy, co powoduje zatrzymanie go na stanowisku. Stan elektromagnesu jest sygnalizowany zieloną diodą LED. Silnik liniowy, zamocowany w pozycji pionowej do płyty głównej, sygnalizuje za pomocą etykiety trwanie właściwego procesu. Stan silnika (aktywny, nieaktywny) jest dodatkowo wskazywany przez dwukolorową diodę LED umieszczoną na obudowie modelu.

### 1.4 Stanowisko kontroli jakości z odbiorem złych elementów

W skład stanowiska kontroli jakości wchodzi zespół ośmiu fotokomórek (ZFKJ), diody nadawcze (DN), silnik liniowy (SLKJ) z chwytakiem ściągającym klocki z taśmy (Z), równi pochyłej (DU) odbierającej elementy sklasyfikowane jako uszkodzone i pojemnika, w którym są gromadzone.

Kontrola jakości przeprowadzana jest przez układ sterujący. Polega ona na wysuwaniu chwytaka nad taśmę, gdy sterownik oceni, że sprawdzany element jest nieodpowiedniej długości. Kształt chwytaka jest tak dobrany, aby kłoczek zsunął się z taśmy na równię pochyłą, która odprowadzi go do pojemnika. Stan pracy kontroli jakości sygnalizowany jest przez dwukolorową diodę LED, gdzie kolor czerwony oznacza uaktywnienie chwytaka, natomiast kolor zielony stan nieaktywny.

### 1.5 Stanowisko odbioru dobrych elementów

Klocki po dotarciu do końca taśmy transportowej samoczynnie zsuwają się po równi pochyłej do pojemnika (DP). Materiały użyte do zbudowania tych elementów modelu są identyczne jak w przypadku stanowiska kontroli jakości.

## 1.6 Zasilacz i moduł sterowania silnikami liniowymi

Zasilacz modelu linii produkcyjnej ma konstrukcję typową, dostarcza napięć stałych +5V, +10V oraz 112V. Napięcie +10V uzyskiwane jest z osobnego transformatora, dzięki czemu można galwanicznie odseparować sterownik silnika taśmy od silników liniowych i przełączników, które są źródłami zakłóceń.

Moduł sterowania silnikami liniowymi zbudowany jest z miniaturowych przełączników, które służą do zmiany polaryzacji zasilania silników liniowych. W stanie spoczynkowym przełączniki podają na silniki napięcie -12 V, gdy zostaną wysterowane zmieniają polaryzację napięcia zasilającego, powodując ruch silnika w przeciwną stronę.

### 1.7 Moduły obsługi wejść i wyjść

Zadaniem układów wchodzących w skład tego modułu jest dopasowanie sygnałów wejściowych i wyjściowych obiektu do standardu akceptowanego przez układ sterujący oraz galwaniczna separacja obiektu od sterownika.

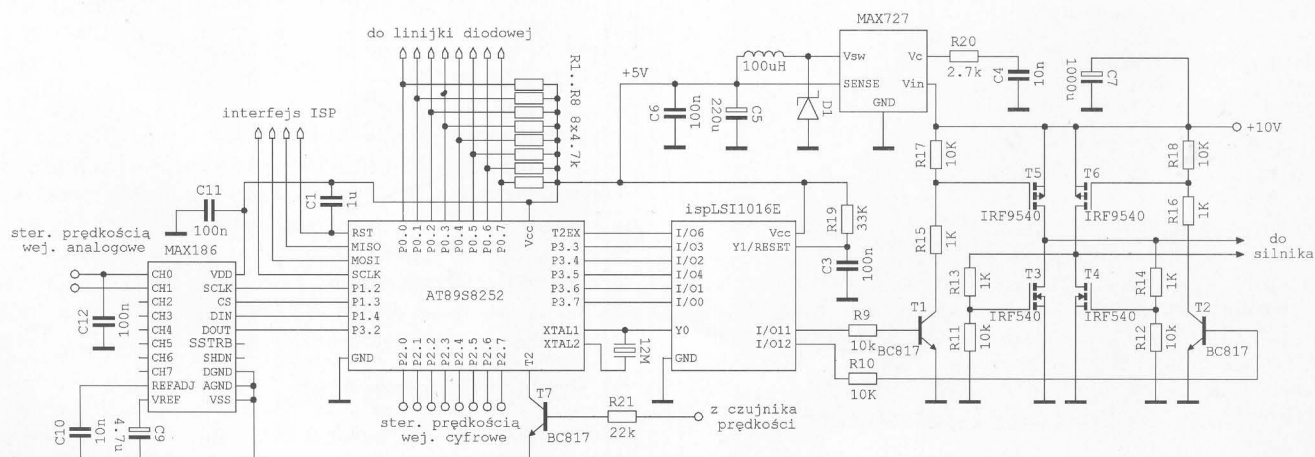
W przypadku sterowania za pomocą układu mikroprocesorowego lub układów typu PLD moduł dokonuje konwersji poziomów sygnałów między standardem TTL a poziomem używanym przez obiekt. Przy sterowaniu przy pomocy sterownika logicznego, moduł przetwarza sygnały napięciowe między standardem przemysłowym +24V a poziomami wewnętrznymi używanymi przez obwody obiektu. Wybór rodzaju konwersji jest automatyczny.

### 1.8 Moduł sterowania silnikiem taśmy

Zastosowano mikroprocesorowy regulator prędkości wykorzystujący klasyczny algorytm regulacji typu PI [7]. Sterownik zbudowano w oparciu o mikrokontroler jednocukładowy typu AT89S8252 firmy ATMEL. Regulator dodatkowo wyposażono w funkcję miękkiego startu (w czasie rozruchu silnika napięcie zwiększane jest stopniowo, co znacznie ogranicza prąd rozruchowy silnika) oraz zabezpieczenia przed przeciążeniem. Regulator umożliwia sterowanie ruchem taśmy w obu kierunkach. Zadana wartość prędkości można ustalać albo poprzez wejścia analogowe (sterowanie napięciowe), albo poprzez wejścia cyfrowe (4 bity). Schemat ideowy regulatora prędkości przedstawiono na rys. 3.

Można tu wyróżnić następujące bloki funkcjonalne:

- czujnik prędkości,
- przetwornik analogowo-cyfrowy,
- sprzętowy modulator PWM,
- końcówka mocy PWM,
- stabilizator impulsowy 5V,
- mikrokontroler jednocukładowy AT89S8252.



Rys. 3. Schemat mikroprocesorowego regulatora prędkości

### Czujnik prędkości

Fotoelektryczny czujnik prędkości zamontowano wewnątrz trójstopniowej przekładni zębatej przenoszącej napęd z silnika do wału napędowego taśmy. Ze względu na brak możliwości zamontowania czujnika bezpośrednio na wale silnika, czujnik umieszczono na jednym z trybów pierwszego stopnia przekładni.

### Przetwornik analogowo-cyfrowy

W celu umożliwienia zadawania prędkości w sposób analogowy zastosowano 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy typu MAX186. Przetwornik posiada: 8 wejść analogowych, wewnętrzne napięcie odniesienia 4,096V, wewnętrzny układ śledząco-pamiętający (track/hold) pracujący z częstotliwością 133kHz oraz szeregowy interfejs SPI do współpracy z mikrokontrolerem.

Przetwornik pracuje w zalecanej przez producenta konfiguracji. Do współpracy z mikrokontrolerem przetwornik wykorzystuje cztery linie portu P1 mikroprocesora. Do wejścia CH0 przetwornika dołączony jest suwak potencjometru, zamontowany na panelu czołowym modelu linii produkcyjnej, który służy do zmiany prędkości przesuwu taśmy.

### Sprzętowy modulator PWM

Wybrany mikrokontroler nie posiada modulatora PWM w swoim standardowym wyposażeniu peryferyjnym, dlatego zdecydowano się na budowę zewnętrznego, sprzętowego modulatora PWM, który realizowany jest przez reprogramowalny układ cyfrowy [4] klasy CPLD - ispLSI1016e.

Do budowy programu realizującego sprzętowy modulator PWM wykorzystany został pakiet oprogramowania ispDesignEXPERT firmy Lattice. Budując schemat logiczny modulatora zastosowano standardowe moduły biblioteczne (liczniki, przerzutniki, bramki) [2].

### Końcówka mocy PWM

Element wykonawczy bezpośrednio zasilający silnik stanowią cztery tranzystory MOSFET pracujące w układzie mostkowym. Do przekątnej mostka dołączony jest silnik. Wysterowanie w danej chwili tylko jednego z tranzystorów T1 lub T2 zapewnia odpowiednio zaprojektowany obwód w modulatorze PWM. Oprogramowanie sterujące zmianą kierunku obrotu silnika wprowadza dodatkowe opóźnienie potrzebne do całkowitego zatrzymania silnika.

### Stabilizator impulsowy 5V

Końcówka mocy PWM wymaga napięcia 10V, natomiast pozostałe obwody zasilane są napięciem 5V, istnieje więc potrzeba zastosowania stabilizatora napięcia 5V. Ze względu na stosunkowo duży pobór prądu przez układ PLD (ok. 90mA), w przypadku zastosowania stabilizatora liniowego konieczne byłoby zastosowanie radiatora. Aby tego uniknąć moduł sterowania silnikiem taśmy wyposażono w stabilizator impulsowy - scaloną przetwornicę DC/DC firmy Maxim typu MAX727. Układ ten wymaga tylko kilku elementów zewnętrznych i nie jest potrzebny żaden proces regulacji.

## 2 Sterowanie procesem

### 2.1 Algorytm sterowania procesem

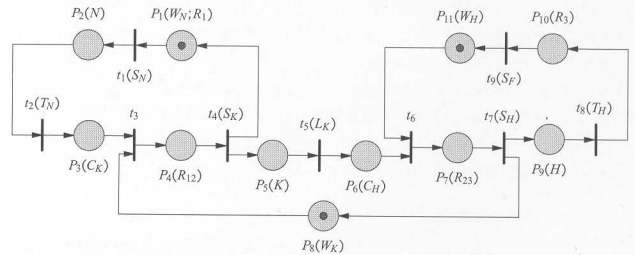
Materiał będący przedmiotem obróbki przechodzi kolejno przez trzy etapy: nagrzewanie, kucia i hartowanie. Obrabiany detal D (rys. 2) przechowywany w podajniku przemieszczany jest na taśmę T za pomocą ramienia podajnika RP, uruchamianego przez silnik liniowy podajnika SLP. Po przybyciu na stanowisko nagrzewania, element zostaje zatrzymany działaniem elektromagnesu EM1 i podlega procesowi ogrzewania przez określony czas. Przebieg procesu sygnalizowany jest etykietą ustawianą przez silnik liniowy SL1. Po jego zakończeniu detal może opuścić stanowisko nagrzewania pod warunkiem, że kolejne stanowisko jest wolne. W przeciwnym razie element pozostaje na stanowisku nagrzewania aż do momentu spełnienia tego warunku. Kolejnym etapem obróbki jest stanowisko kucia. Podobnie jak przy nagrzewaniu element zostaje zatrzymany przez elektromagnes EM2, a proces sygnalizowany jest silnikiem liniowym SL2. Opuśzczenie stanowiska kucia uwarunkowane jest zwolnieniem stanowiska hartowania, będącego następnym etapem obróbki. Element pojawiający się na stanowisku hartowania zostaje zatrzymany przez elektromagnes EM3, proces sygnalizowany jest silnikiem SL3 i po jego zakończeniu gotowy element transportowany jest na stanowisko kontroli jakości. Proces ten polega na ocenie długości obrobionego detalu za pomocą czujników ZFKJ. Element sklasyfikowany jako uszkodzony usuwany

jest z taśmy ramieniem zbieraka Z do pojemnika DU, zaś element prawidłowy umieszczony jest w pojemniku DP znajdujący się na końcu taśmy.

Przyjmując się, że w każdej chwili na danym stanowisku może znajdować się tylko jeden element. Materiał może przesuwać się z lewej strony na prawą bez możliwości wyminięcia poprzedzającego go elementu. Materiał obrobiony w  $i$ -tym stanowisku może zostać przesunięty tylko do zwolnionego kolejnego stanowiska  $i+1$ . Stanowisko  $i$  uważa się za zwolnione dopiero po dotarciu elementu na stanowisko  $i+1$ . Położenie detalu na taśmie kontrolowane jest przez zespół czujników. Czujniki ZF1, ZF2 i ZF3 informują o obecności elementu odpowiednio na stanowiskach nagrzewania, kucia i hartowania, zaś czujniki ZFKJ na stanowisku kontroli jakości. Procesy nagrzewania i hartowania kontrolowane są elementami czasowymi, natomiast kucie nadzorowane jest przez licznik uderzeń młota. Elementy czasowe i licznik powinny być zamodelowane przez układ sterujący.

### 2.2 Model sieci Petriego opisującej proces sterowania

Prezentowany proces można zamodelować siecią Petriego przedstawioną na rys. 4. Składa się ona z dziewięciu tranzycji i jedenastu miejsc. W modelu tym pominięto proces kontroli jakości obrobionego detalu, zakładając poprawność procesu obróbki. Miejsca obrazują stan procesu kucia na gorąco, a w szczególności stany, w jakich mogą znajdować się detale biorące w nim udział. Wśród tranzycji wyróżnić można: tranzycje powiązane z sygnałami z czujników umieszczonych na obiekcie, tranzycje związane z informacjami generowanymi przez licznik i elementy czasowe modelujące działanie procesów na poszczególnych stanowiskach oraz dwie tranzycje stanowiące przejścia bezwarunkowe.



Rys. 4. Sieć Petriego sterująca obiektem

Miejsca P1(WN, R1), P8(WK) i P11(WH) symbolizują odpowiednio wolne stanowiska nagrzewania, kucia i hartowania. Umieszczenie znaczników w tych miejscach (markowanie początkowe) oznacza stan rozpoczęcia procesu produkcji. Procesom nagrzewania, kucia i hartowania odpowiadają miejsca P2(N), P5(K) i P9(H). Przeszczanie się elementów symbolizuje pojawienie się znaczników w miejscach P4(R12) i P7(R23), gdzie oznaczenie  $R_{ij}$  odpowiada transportowi elementu ze stanowiska  $i$  na stanowisko  $j$ . Ponadto miejsce P1(WN, R1) informuje o przemieszczeniu się elementu na stanowisko nagrzewania, zaś P10(R3) o przemieszczeniu się elementu na stanowisko kontroli jakości. Miejsca P2(CK) i P6(CH) oznaczają odpowiednio oczekiwanie na zwolnienie stanowiska kucia i oczekiwanie na zwolnienie stanowiska hartowania. Detal znajdujący się w stanie oczekiwania nie podlega ani obróbce, ani procesowi przemieszczania.

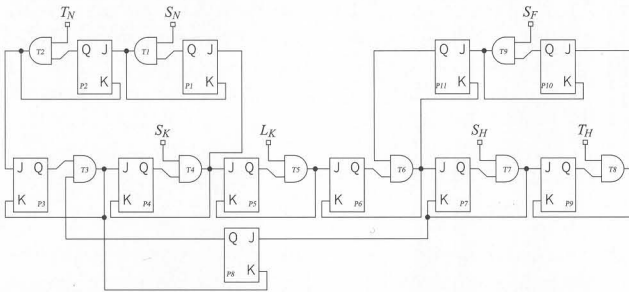
Zadaniem tranzycji jest wykrywanie zdarzeń zachodzących w procesie sterowania. Sygnały na wejściach tranzycji z symbolami SN, SK i SH oznaczają stan, w którym przemieszczający się detal zasłania tylko ostatnią fotokomórkę z zespołu fotokomórek ZF1, ZF2, ZF3. Sygnał SF informuje o zasłonięciu przez transportowany materiał ostatniej fotokomórki z zespołu fotokomórek kontroli jakości ZFKJ. Sygnały wejściowe TN i TH informują, że upłynął zadany czas nagrzewania i hartowania. Sygnał LK służy do pokazania, że w procesie kucia zliczona została pożądana liczba uderzeń młota.

Pojawienie się znacznika w danym miejscu jest jednoznaczne z działaniem elementu lub elementów wykonawczych związanych z tym miejscem. Na przykład, na przykład, w wyniku pojawienia się znacznika w miejscu P2(N), musi zadziałać elektromagnes EM1 zatrzymujący element na stanowisku nagrzewania, rozpoczyna się proces nagrzewania i inicjowany jest pomiar czasu jego trwania. Informacja

o upływie zadanego czasu przekazywana jest na tranzycję t2(TN), spełniając w ten sposób warunek jej odpalenia. Wówczas znacznik opuści miejsce P2(N) wyłączając sygnalizację procesu.

### 2.3 Odzworowanie sieci Petriego na schemat logiczny

Sieć Petriego można przedstawić w postaci schematu logicznego stosując metodę syntezy polegającą na zastąpieniu każdego miejsca sieci przermutnikiem JK a każdą tranzycję przez bramkę iloczynową logicznego [5]. Schemat logiczny odpowiadający zamodelowanej sieci pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat logiczny odpowiadający sieci Petriego

#### Sterowanie i wizualizacja

Sterowanie procesem opisanym siecią Petriego zrealizowano na sterowniku logicznym PLC Simatic S7-314 firmy Siemens. Program automatycznego sterowania obiektem utworzono w postaci schematu drabinkowego [3] za pomocą oprogramowania narzędziowego STEP 7. W programie wyodrębnić można podstawowe moduły: interfejs we/wy umożliwiający wymianę danych pomiędzy obiektem, programem i aplikacją wizualizacji procesu, bloki bramek i przerzutników oraz moduł modelujący procesy i sterujące urządzeniami wykonawczymi.

Rysunek 6 przedstawia fragment sieci obejmujący miejsca P1-P4 i tranzycje t1-t4 oraz odpowiadający jej schemat drabinkowy. Schemat drabinkowy uzyskano z programu STEP7. Przerzutniki JK stanowią funkcję zrealizowaną na podstawie równania

$$Q_{n+1} = J \cdot \bar{Q}_n + \bar{K} \cdot Q_n$$

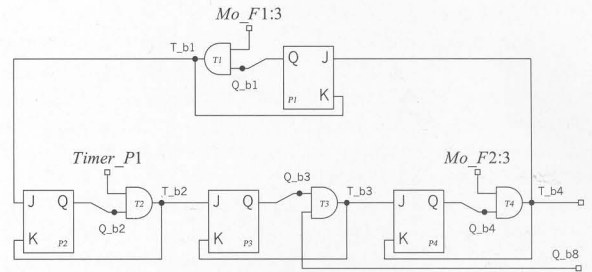
Sterowanie elementami wykonawczymi realizowane jest na podstawie stanów logicznych wyjść poszczególnych przerzutników.

Wizualizacja procesu sterowania wykonana została za pomocą oprogramowania WinCC firmy Siemens. Utworzono szereg ekranów synoptycznych umożliwiających m. in. sterowanie procesem z poziomu operatora (np. wybór trybu sterowania pomiędzy manualnym a automatycznym, manualne sterowanie poszczególnymi urządzeniami procesu) i graficzne zobrazowanie działania procesu produkcyjnego, a przede wszystkim monitorowanie aktualnego stanu sieci Petriego. Jeden z przykładowych ekranów przedstawiono na rys. 7, na którym obiekt jest w trakcie przeprowadzania procesów nagrzewania i kucia. Stanowisko hartowania jest wolne. Dzielona struktura ekranu umożliwia zarówno monitorowanie procesu produkcyjnego jak i weryfikację poprawności jego przebiegu na podstawie obserwacji sieci Petriego.

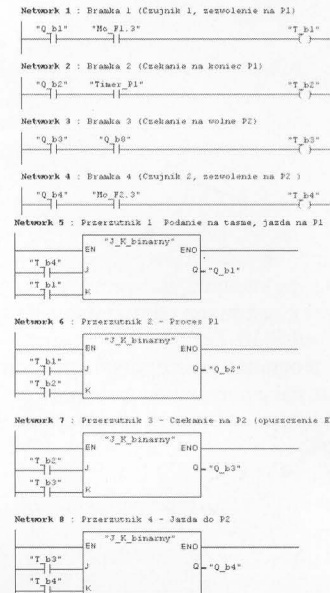
### 3 Podsumowanie

Przedstawiony obiekt wykorzystywany jest do badań nad zastosowaniem sieci Petriego do sterowania procesami współbieżnymi. Algorytmy sterujące realizowane są zarówno na drodze programowej, przy wykorzystaniu sterowników logicznych lub sterowników mikroprocesorowych, jak i na drodze sprzętowej (reprogramowalne układy scalone). Tematem dalszych prac badawczych jest zastosowanie do sterowania obiektem bardziej zaawansowanych algorytmów przeznaczonych do sterowania procesami współbieżnymi oraz opracowanie i użycie technik pozwalających na automatyczną weryfikację poprawności przebiegu procesu symulowanego przez urządzenie.

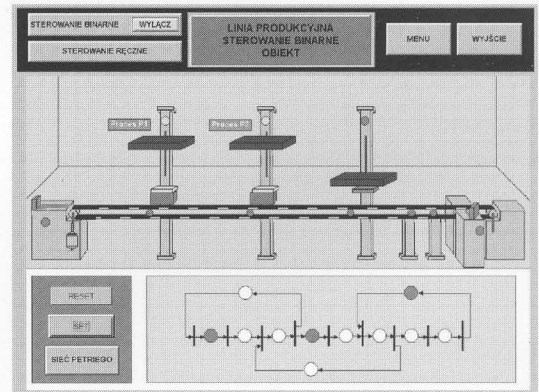
Model linii produkcyjnej używany jest również podczas zajęć dydaktycznych w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej.



Rys. 6a. Schemat logiczny odpowiadający schematowi drabinkowemu



Rys. 6b. Program w języku drabinkowym



Rys. 7. Wizualizacja programu sterującego

Praca częściowo finansowana przez KBN, grant nr 7 T11A 018 21.

### Literatura

- [1] Banaszak Z., Kuś J., Adamski M. Sieci Petriego, WWSI, Zielona Góra 1993.
- [2] Lattice Semiconductor Corp.: Lattice System Macro Library, 1993
- [3] Legierski T., Kasprzyk J., Wyrwał J., Hajda J., Programowanie sterowników PLC, WPK, Gliwice 1998.
- [4] Łuba T., Jasiński K., Zbierchowski B. Specjalizowane układy cyfrowe w strukturach PLD i FPGA, WKiŁ, Warszawa 1997.
- [5] Misiurewicz P., Zagadnienia projektowania cyfrowych układów sterowania binarnego, VII Krajowa Konferencja Automatyki 1980, t. 1, s. 664 - 670, Szczecin, 1980
- [6] Starke P. H., Sieci Petrii - podstawy, zastosowania, teoria, PWN, Warszawa, 1987
- [7] Świder Z., Sterowniki mikroprocesorowe, OW PRZ, Rzeszów 1999.

**Title:** A Model of a Controller For Production Line of Hot-Forging Process.

Artykuł recenzowany