

# Synteza pneumatycznych układów sterowania

D. Nowak<sup>a</sup>, R. Więclawek<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Zakład Odlewnictwa i Automatykacji, Politechnika Wrocławska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska

\*Kontakt korespondencyjny: e-mail: rafal.wieclawek@pwr.wroc.pl

Otrzymano 11.04.2011; zaakceptowano do druku 26.04.2011

## Streszczenie

Mechanizacja i automatyzacja procesów odlewniczych przynosi znaczne korzyści między innymi dzięki wzrostowi wydajności i jakości produkcji. Pomimo że obecnie podstawowym narzędziem automatyzacji procesów produkcyjnych są programowalne sterowniki logiczne PLC, w wielu obszarach, ze względu na swoje zalety, zastosowanie pneumatycznych układów sterowania może być bardziej uzasadnione. Jednak podstawowym czynnikiem decydującym o wyborze techniki sterowania są koszty. W przypadku układów pneumatycznych o kosztach decyduje liczba użytych elementów. Dlatego podczas prac projektowych istotne znaczenie ma wybór odpowiedniej metody syntezy pneumatycznych układów sterowania. W artykule przedstawiono metodę MTS opracowaną w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej do modelowania dyskretnych procesów technologicznych i programowania sterowników PLC, którą można także zastosować, po wprowadzeniu pewnych modyfikacji, do projektowania pneumatycznych układów sterowania. Istotnym elementem metody MTS jest sieć działań, która w sposób graficzny przedstawia algorytm realizowanego procesu. W oparciu o sieć działań i schemat funkcjonalny maszyny roboczej wyznacza się diagram stanów, który w sposób graficzny przedstawia przebieg zmian sygnałów wejściowych i wyjściowych układu sterowania. Analiza diagramu stanów, na podstawie opisanego algorytmu, pozwala w prosty sposób wyznaczyć równanie schematowe, które stanowi podstawę do realizacji układu sterowania. Istotną zaletą metody MTS jest brak ograniczeń odnośnie liczby sygnałów wejściowych i wyjściowych układu sterowania. Natomiast uzyskane rozwiązanie charakteryzuje się minimalną liczbą elementów potrzebnych do realizacji układu sterowania.

**Słowa kluczowe:** Automatykacja procesów odlewniczych, metoda MTS, układy pneumatyczne.

## 1. Wprowadzenie

Mechanizacja i automatyzacja procesów odlewniczych przynosi znaczne korzyści między innymi dzięki wzrostowi wydajności i jakości produkcji [1, 2, 3]. Obecnie podstawowym narzędziem automatyzacji procesów produkcyjnych są programowalne sterowniki logiczne PLC [4, 5]. W związku z tym całkowicie pneumatyczne układy sterowania są stosowane coraz rzadziej. Niewątpliwą zaletą pneumatycznych układów sterowania w porównaniu z układami elektronicznymi, zwłaszcza w warunkach panujących w odlewni, jest duża odporność na wahania temperatury, wilgotności i zapylenia. Nie bez znaczenia jest także fakt powszechnego stosowania sprężonego powietrza w procesach odlewniczych [6, 7, 8]. Ograniczeniami określającymi opłacal-

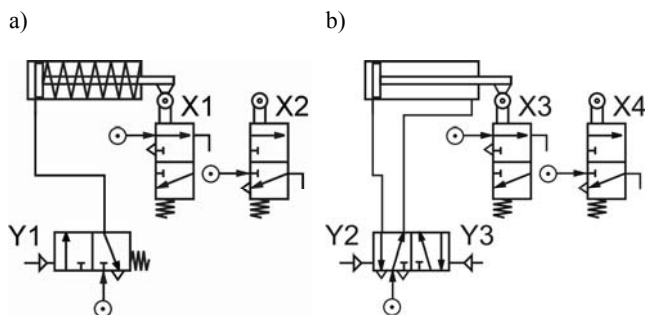
ność stosowania pneumatycznych układów sterowania są: odległość między układem sterowania a obiektem nie przekraczająca 4m oraz liczba elementów użytych do ich budowy. W praktyce liczba wyjść i wejść nie powinna przekraczać 30 [9]. Dlatego podczas prac projektowych istotne znaczenie ma wybór odpowiedniej metody syntezy pneumatycznych układów sterowania.

Opracowano wiele metod syntezy pneumatycznych układów sterowania, które można podzielić na analityczne i algorytmiczne [10]. W metodach algorytmicznych stosuje się określone przepisy na dobór elementów i sposób ich łączenia. Natomiast metody analityczne wykorzystują prawa algebry Boole'a do wyznaczenia funkcji logicznych, jakie muszą być zrealizowane przez poszukiwany układ sterowania.

Do projektowania pneumatycznych układów sterowania można także zastosować metodę MTS, która została opracowana do modelowania dyskretnych procesów technologicznych i programowania sterowników PLC [11]. Metoda MTS umożliwia syntezę równania schematowego sekwencyjnego układu sterowania, które może być użyte do budowy stykowo-przełącznikowego układu sterowania bądź do zaprogramowania sterownika PLC. Wprowadzenie pewnych modyfikacji umożliwia stosowanie metody MTS także do syntezy pneumatycznych układów sekwencyjnych.

## 2. Pneumatyczne zespoły wykonawcze

Przystępując do projektowania pneumatycznego układu sterowania metodą MTS zakłada się, że będą stosowane zespoły wykonawcze pokazane na rys. 1 lub inne o podobnym sposobie napędu i sygnalizacji stanów ich pracy. Elementami wykonawczymi są siłowniki pneumatyczne jednostronnego lub dwustronnego działania a także siłowniki o ruchu obrotowym wahadłowym. Do sterowania pracą siłowników są stosowane zawory rozdzielające dwupołożeniowe, monostabilne lub bistabilne, sterowane jednostronnie lub obustronnie sprężonym powietrzem. Kontrola położenia tłoczków siłowników jest realizowana przez komplet wyłączników krańcowych, którymi są zawory trójdrogowe z rolką, sterowane zderzakiem na tłoczysku.



Rys.1 Schemat pneumatycznych zespołów wykonawczych z zaworem: monostabilnym (a), bistabilnym (b)

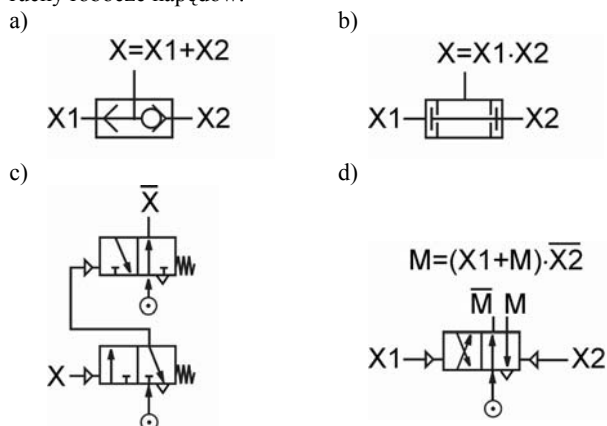
Zakłada się również, że do realizacji funkcji logicznych w projektowanym układzie sterowania będą stosowane zawory specjalne realizujące funkcje alternatywy, koniunkcji i negacji (rys. 2). Natomiast do realizacji funkcji pamięci są stosowane dwustanowe zawory rozdzielające, spełniające rolę przerzutników.

Mogą być także stosowane:

- elementy wejściowe - zawory rozdzielające sterowane ręcznie lub mechanicznie, realizujące funkcje: start, stop, praca krokowa, praca automatyczna, itp.,
- elementy nie wpływające na zmianę założonego programu pracy układu - zawory zwrotno-dławiące, zawory szybkiego spustu itp.

Przy tych założeniach sygnały wejściowe układu sterowania  $X1, X2, \dots, Xn$  są generowane przez wyłączniki krańcowe, sygnały

wewnętrzne (pamięć)  $M1, M2, \dots, Mm$  realizowane są przez przerzutniki, natomiast sygnały wyjściowe układu sterowania  $Y1, Y2, \dots, Yk$  sterują zaworami rozdzielającymi odpowiedzialnymi za ruchy robocze napędów.



Rys.2. Zawory specjalne realizujące funkcje alternatywy (a), koniunkcji (b), negacji (c) oraz pamięci (d)

## 3. Metoda MTS

### 3.1 Sieć działań

Podstawową formą opisu algorytmu działania maszyny roboczej jest zdanie warunkowe: „Jeżeli..., to...”. W związku z tym cykl pracy można podzielić na tzw. kroki. Kroki są numerowane począwszy od kroku  $K1$  do ostatniego. Jeden cykl obejmuje wszystkie kroki maszyny roboczej. Każdy krok może być realizowany tylko przez jeden napęd. Graficzny symbol kroku pokazano na rys. 3a. Wewnątrz umieszcza się, obok litery wskazującej napęd realizujący krok, znak „+” do oznaczenia wysuwu lub znak „-” do oznaczenia wsuwu. Natomiast w nawiasie umieszcza się oznaczenie sygnału wyjściowego układu sterowania, który powoduje ruch. Jeśli ruch odbywa się przy sygnale  $Yi=0$ , to taki sygnał oznacza się symbolem  $\bar{Y}_i$ .

Z każdym krokiem jest związane przejście, którego symbol graficzny pokazano na rys. 3b. Wewnątrz umieszcza się warunek przejścia, którego spełnienie powoduje przejście do realizacji następnego kroku (wyjście TAK). Natomiast krok wskazywany przez wyjście NIE (łuk skierowany) jest realizowany do momentu spełnienia warunku przejścia.

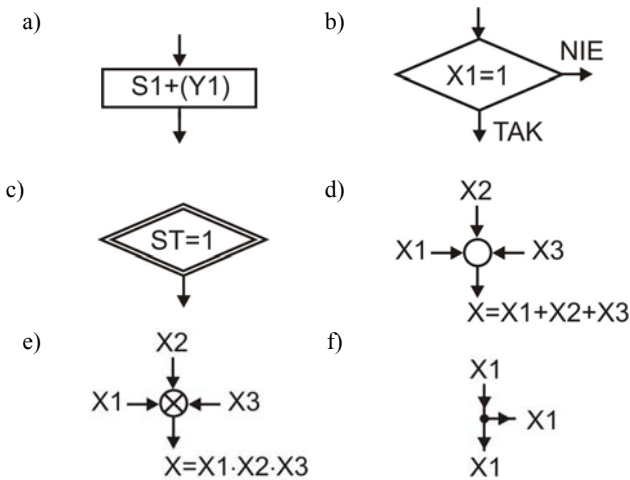
Symbol graficzny pokazany na rys. 3c stosuje się do reprezentacji sygnałów pochodzących od elementów wejściowych: start, stop itp.

Węzły logiczne reprezentują złożone warunki, które muszą być spełnione, aby przejść do kolejnego kroku. W przypadku węzła alternatywy (rys. 3d) przejście jest możliwe wtedy gdy  $X1=1$  lub  $X2=1$  lub  $X3=1$ , natomiast w przypadku węzła koniunkcji (rys. 3e) przejście nastąpi gdy  $X1=1$  i  $X2=1$  i  $X3=1$ .

Symbol pokazany na rys. 3f oznacza rozgałęzienie sygnału. Sygnały za węzłem rozgałęzienia mają takie same wartości jak sygnał przed węzłem.

Z opisanych wyżej elementów tworzy się tak zwaną sieć działań, która stanowi graficzny opis pracy układu. Przy budowie sieci działań należy przestrzegać następujących zasad:

1. Sieć działań jest przedstawiana według konwencji zapisu od góry do dołu, zgodnie z kolejnością realizowanych kroków. Odstępstwa od pionowej kolejności oznacza się strzałkami.
2. Sąsiednie kroki muszą być rozdzielone warunkiem przejścia.
3. Sąsiednie warunki przejścia muszą być rozdzielone krokiem.



Rys. 3. Symbole graficzne stosowane do budowy sieci działań: krok (a), przejście (b), sygnał niezależny od realizowanego algorytmu (c), węzeł alternatywy (d), węzeł koniunkcji (e), węzeł rozgałęzienia sygnału (f)

### 3.2. Diagram stanów

Kolejnym etapem jest wyznaczenie, w oparciu o sieć działań, diagramu stanów, który stanowi zapis w układzie dwóch współrzędnych sekwencji zmian wszystkich sygnałów wejściowych i wyjściowych układu sterowania.

Współrzędne pionowe przedstawiają kolejne kroki w cyklu, natomiast współrzędne poziome wyrażają stan elementów sygnałowych i sterujących. Wartość 1 przyporządkowuje się gdy na wyjściu danego elementu występuje ciśnienie zasilania. Wartość 0 oznacza, że na wyjściu elementu występuje ciśnienie atmosferyczne.

Na podstawie współrzędnych i sieci działań tworzy się siatkę, na której graficznie przedstawia się zmiany stanów sygnałów wyjściowych i wejściowych w całym cyklu.

W pierwszej kolejności wyznacza się diagram stanów sygnałów wyjściowych układu sterowania. Zakłada się przy tym, że elementy sterujące działają idealnie i mają charakter dwustanowy. A zatem nie uwzględnia się stanu przejściowego części ruchomej elementu (suwaka, tłoczyska) jak i rzeczywistych zmian pneumatycznej części sterującej [12]. W związku z tymi założeniami zmiany sygnałów wyjściowych oznacza się w diagramie poziomymi odcinkami w miejscach, w których kończy się realizacja kroku i rozpoczyna realizacja kroku następnego. Taki zapis znacznie ułatwia analizę i syntezę pneumatycznego układu stero-

wania. Jednak w konsekwencji takiego uproszczenia otrzymane rozwiązanie nie zawsze będzie optymalne ze względu na ilość elementów potrzebnych do budowy układu sterowania.

Następnie wyznacza się diagram stanów sygnałów wejściowych układu sterowania przy założeniu, że elementy sygnałowe działają krokowo [12]. Należy tutaj uwzględnić czas przejścia elementu ruchomego z jednego stanu do drugiego, natomiast działanie części pneumatycznej traktuje się jako idealne, dwustanowe. Przyjmuje się także, że w danej chwili czasu tylko jeden sygnał wejściowy może zmienić swój stan (nie dotyczy to sygnałów wyjściowych).

Zatem cykl pracy można podzielić na skończoną liczbę przedziałów czasowych, zwanych taktami, w których nie zachodzą żadne zmiany. Takty nie są określone przedziałem czasu, dlatego mogą trwać dowolnie długo. W sieci działań takty oznaczają się numerami porządkowymi.

### 3.3. Równanie schematowe

Kolejnym etapem jest wyznaczenie równania schematowego, które opisuje strukturę pneumatycznego układu przełączającego. Polega to na wyznaczeniu wszystkich funkcji  $F(Y_i)$ , określających zależność sygnałów wyjściowych  $Y_i$  od sygnałów wejściowych pneumatycznego układu sterowania oraz stanów wewnętrznych (pamięci). W pracy [13] opisano reguły, wg których można wyznaczyć taki opis. W ogólnym przypadku zadanie sprowadza się do rozwiązywania równań następującej postaci

$$F(Y_i) = (fp_j \cdot f' + Y_i) \cdot (fk_j \cdot f'') \quad (1)$$

lub

$$F(Y_i) = (fp_j \cdot f' + Y_i) \cdot (fk_j + f'') \quad (2)$$

gdzie:

$Y_i$  – sygnał odpowiedzialny za realizację kroku  $K_j$ ,

$fp_j$  – warunek przejścia do realizacji kroku  $K_j$  – jest nim warunek przejścia umiejscowiony w sieci działań bezpośrednio przed krokiem  $K_j$ ,

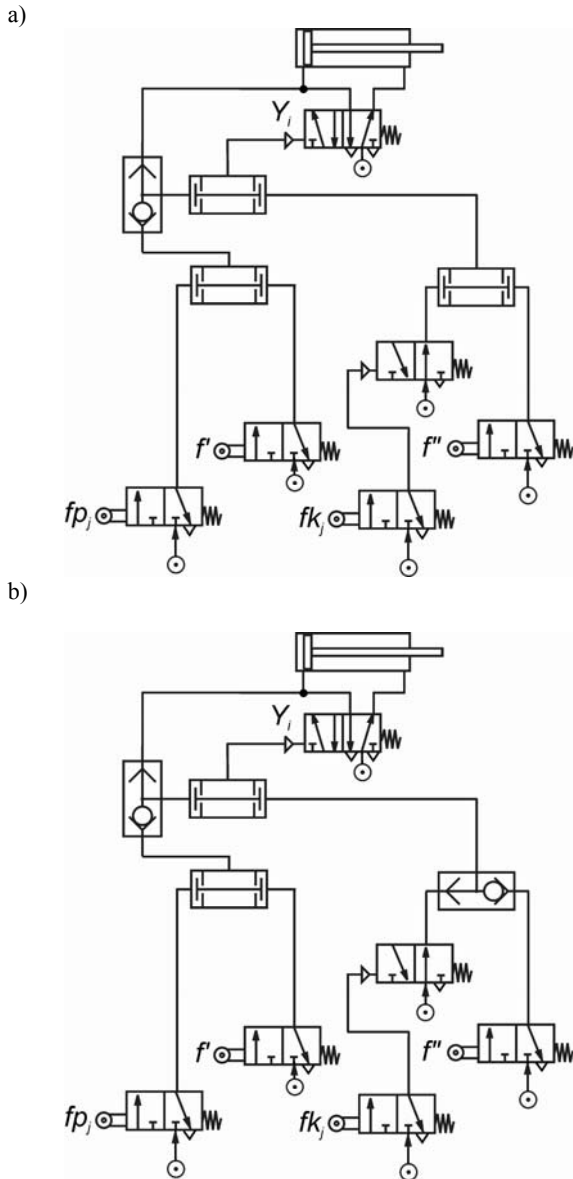
$fk_j$  – warunek zakończenia realizacji kroku  $K_j$  – jest nim zanegowany warunek przejścia połączony w sieci działań z krokiem  $K_j$  łukiem skierowanym,

$f', f''$  – sygnały ze zbioru  $(X1, X2, \dots, Xn, \bar{X}1, \bar{X}2, \dots, \bar{X}n)$  lub  $(M1, M2, \dots, Mm, \bar{M}1, \bar{M}2, \dots, \bar{M}m)$  dobrane w taki sposób, aby były spełnione równania (1) lub (2).

Schematy układów pneumatycznych zrealizowanych na podstawie równań (1) i (2) przy użyciu elementów specjalnych realizujących funkcje: alternatywy, koniunkcji i negacji pokazano na rys. 4. Jak łatwo zauważyć, sygnał sterujący  $Y_i = 0$  powoduje automatyczne odprowadzenie zużytego powietrza z układu sterowania do atmosfery, zatem nie ma potrzeby projektowania dodatkowych obwodów odpowietrzających.

Należy tutaj podkreślić, że przedstawione rozwiązania ogólne są wystarczające do realizacji dowolnego sygnału sterującego w układzie sekwencyjnym, ale w szczególnych przypadkach rozwiązanie może mieć prostszą postać. To oznacza, że niektóre

funkcje można pominąć w równaniach (1) i (2) a tym samym można zrezygnować z elementów realizujących te funkcje w układach pokazanych na rys. 4.



Rys. 4. Schematy układów pneumatycznych zrealizowanych na podstawie: równania (1) (a), równania (2) (b)

Poszukiwanie rozwiązań dla kolejnych sygnałów \$Y\_i\$ należy rozpocząć od analizy iloczynu \$fp\_i \cdot fk\_i\$, wyznaczonego graficznie na podstawie diagramu stanów. W każdym taktcie musi być spełniona zależność

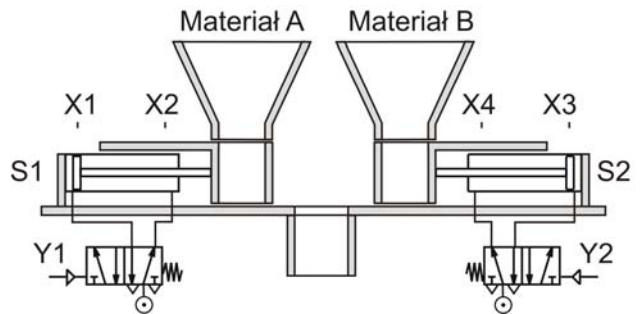
$$F(Y_i) = fp_i \cdot fk_i \quad (3)$$

Jeśli powyższa zależność nie jest spełniona, wówczas należy poszukiwać rozwiązań zgodnie z równaniami (1) i (2).

## 4. Przykład

Na rys. 5 pokazano schemat funkcjonalny dozownika skrzynkowego materiałów sypkich [14]. W pozycji wyjściowej materiał z zasobników wypełnia skrzynki dozujące. Rozpoczęcie procesu dozowania inicjuje przycisk \$ST\$. W pierwszym kroku następuje wysuw siłownika \$S1\$ co powoduje przesunięcie skrzynki nad otwór wylotowy i zadozowanie materiału A. W drugim kroku następuje wsuw siłownika \$S1\$ do pozycji wyjściowej. W trzecim kroku jest realizowany wysuw siłownika \$S2\$ (dozowanie materiału B). Ostatni krokiem jest wsuw siłownika \$S2\$.

Sterowanie napędami jest realizowane poprzez zawory pneumatyczne monostabilne. Sygnał \$Y1=1\$ powoduje wysuw a \$Y1=0\$ powoduje wsuw siłownika \$S1\$. Podobnie odbywa się sterowanie siłownikiem \$S2\$ za pomocą sygnału \$Y2\$. Skrajne położenia tłoczyk siłowników są sygnalizowane przez wyłączniki krańcowe \$X1, X2, X3, i X4\$.



Rys. 5. Schemat funkcjonalny dozownika skrzynkowego materiałów sypkich

Sieć działań oraz diagram stanów dla powyższego procesu pokazano na rys. 6.

Sygnał \$Y1=1\$ jest odpowiedzialny za wykonanie kroku \$K1\$. Warunki realizacji tego kroku są następujące

$$fp1 = ST \cdot X3; \quad fk1 = \overline{X2} \quad (4)$$

Jak widać na rys. 6, zależność \$F(Y\_1) = fp\_1 \cdot fk\_1\$ nie jest spełniona, gdyż w taktach nr 4 i 5 iloczyn \$fp\_1 \cdot fk\_1\$ przyjmuje niepożądany stan 1. Można go wyeliminować tylko przez zastosowanie sygnału pamięci \$M\$, którą należy zrealizować według równania

$$F(M) = (X2 + M) \cdot \overline{X4} \quad (5)$$

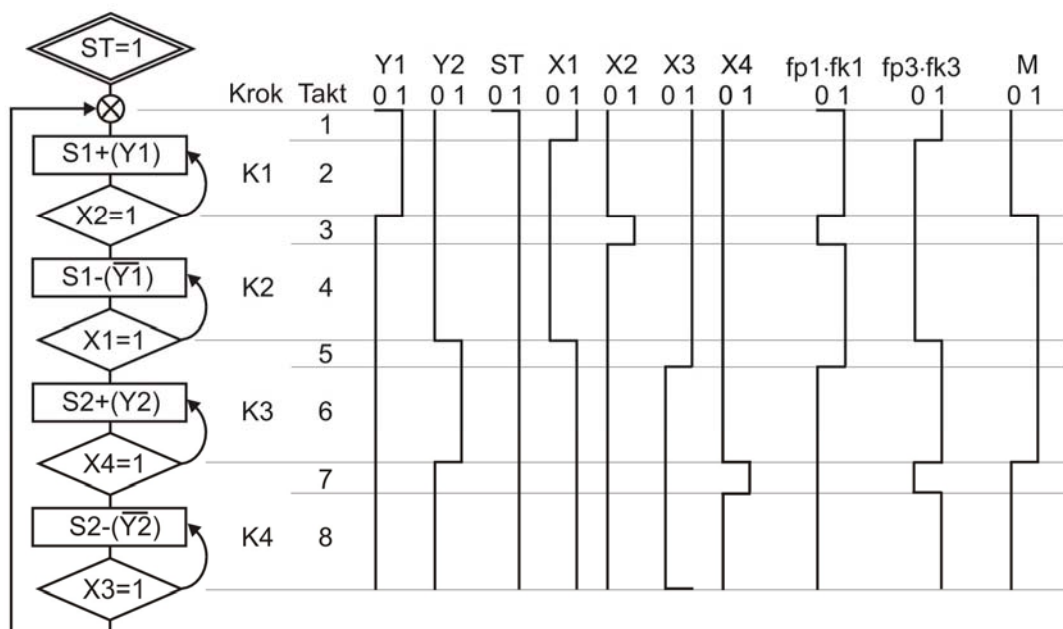
Sygnał \$X2=1\$ powoduje ustawienie \$M=1\$ i zapamiętanie tego stanu, natomiast \$X4=1\$ powoduje ustawienie \$M=0\$ i również zapamiętanie tego stanu.

Dzięki tak zrealizowanej pamięci można zapisać

$$F(Y1) = fp1 \cdot fk1 \cdot \overline{M} = ST \cdot X3 \cdot X2 \cdot \overline{M} \quad (6)$$

a po minimalizacji

$$F(Y1) = ST \cdot X3 \cdot \overline{M} \quad (7)$$



Rys. 6. Sieć działań oraz diagram stanów dla przykładowego procesu

Sygnal  $Y2=1$  odpowiada za wykonanie kroku  $K3$ . Warunki realizacji tego kroku są następujące

$$fp3 = X1; \quad fk3 = \overline{X4} \quad (8)$$

Również w tym przypadku zależność  $F(Y2)=fp3 \cdot fk3$  nie jest spełniona, gdyż w taktach nr 1 i 8 iloczyn  $fp3 \cdot fk3$  przyjmuje niepożądany stan 1. Można go wyeliminować przez zastosowanie sygnału pamięci  $M$ .

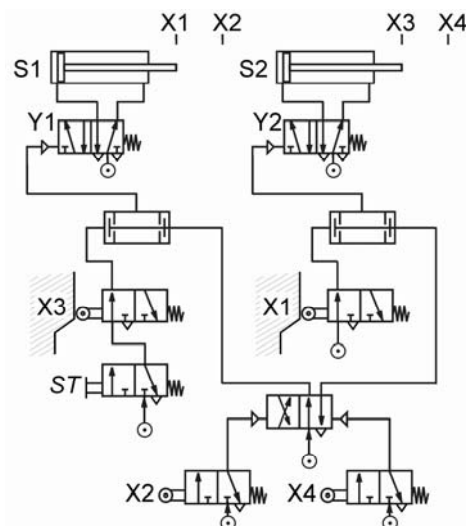
W związku z tym można zapisać

$$F(Y2) = fp3 \cdot fk3 \cdot M = X1 \cdot \overline{X4} \cdot M \quad (9)$$

a po minimalizacji otrzymamy

$$F(Y2) = X1 \cdot M \quad (10)$$

Schemat pneumatycznego układu sterowania zrealizowanego na podstawie równań: (5), (7) i (10) pokazano na rys.7.



Rys. 7. Schemat pneumatycznego układu sterowania dla przykładowego procesu

## 5. Wnioski

Metoda MTS umożliwia w formalny i precyzyjny sposób przedstawić algorytm działania dowolnego procesu realizowanego sekwencyjnie. Nie narzuca przy tym ograniczeń odnośnie liczby realizowanych kroków ani liczby sygnałów wejściowych i wyjściowych. Dzięki diagramowi stanów można łatwo, w sposób analityczny, wyznaczyć równanie schematowe stanowiące podstawę do budowy pneumatycznego układu sterowania.

W porównaniu z metodami algorytmicznymi, układ sterowania zaprojektowany metodą MTS potrzebuje zwykle mniejszej ilości elementów koniecznych do jego budowy. A zatem w wielu przypadkach koszt takiego układu sterowania może być konkurencyjny w stosunku obecnie stosowanych, elektronicznych układów sterowania.

Dalsze badania będą prowadzone w kierunku opracowania algorytmu, który umożliwi syntezę układu sterowania przy minimalnej ilości elementów realizujących pamięć (przerzutników).

## Literatura

- [1] A. Fedoryszyn, Assessment of systems for mechanisation of casting production, Archives of Foundry Engineering, vol. 7, iss. 3 (2007), 83-86.
- [2] S. Kukla, Evaluation and verification of time and costs of production activities in foundry industry, Archives of Foundry Engineering, vol. 7, iss. 3 (2007), 79-82.
- [3] A. Fedoryszyn, A characteristic of design solutions for flask moulding lines, Archives of Foundry Engineering, vol. 7, iss. 1 (2007), 5-8.
- [4] A. Fedoryszyn, Flask casting lines with home-produced moulding devices, Archives of Foundry, Vol. 6, No. 21 (2007), 31-36, (in Polish).
- [5] Ł. Dworzak, T. Mikulczyński, Synthesis of sequential control algorithms for pneumatic drives controlled by monostable valves, Archives of Foundry Engineering, Vol. 9, iss. 3 (2009), 35-40.
- [6] D. Homa, H. Szluczyk, K. Janerka, Operation of pneumatic conveying systems in technological processes, Archives of Foundry Engineering, Vol. 9, iss. 1 (2009), 73-78.
- [7] D. Homa, K. Janerka, J. Szajnar, J. Jezierski, Aplikacje transportu pneumatycznego w odlewnictwie, Archives of Foundry Engineering, Vol. 10, iss. 4 (2010), 19-26.
- [8] D. Homa, Z. Gorazda, A Myszor, Pneumatic reclamation devices applied in the conditions of Ostrowiec Foundry, Archives of Foundry Engineering, Vol. 10, iss. 2 (2010), 65-69 (in Polish).
- [9] Ł. Węsierski, Projektowanie pneumatycznych układów sterujących, Pneumatyka, no 4, (2011), 43-46. (in Polish).
- [10] W. Szenajch, Napęd i sterowanie pneumatyczne, WNT (1994) (in Polish).
- [11] T. Mikulczyński, Z. Samsonowicz, A mathematical model of discrete manufacturing process control, Control Engineering Practice, Vol. 4, Nr 9, (1996), s. 1249-1260.
- [12] Ł. Węsierski, Rzeczywiste działanie pneumatycznych układów napędowo-sterujących, Pneumatyka Nr 1, (2001), 24-26.
- [13] T. Mikulczyński, Z. Samsonowicz, R. Więclawek, The computer aided programming of PLCs with the MTS method, Automation' 98, (1998), 111-117.
- [14] Z. Samsonowicz, Automatyzacja procesów odlewniczych, WNT (1985)

## Synthesis of pneumatic controll systems

### Abstract

Currently, the basic tool for automating the production processes are the PLCs. However, in many areas application of the pneumatic control systems may be more reasonable. The main factor determining choice of the control technology are costs. In the case of pneumatic systems, the costs shall be determined by the number of elements used. Therefore, during the design works it is important to choose an appropriate method for the pneumatic control systems synthesis. The article presents the MTS method, which may be used for a discrete technological processes modeling and PLC programming, as well as for a pneumatic control systems designing. An important element of the MTS method is the network of actions, which graphically presents an algorithm of the implemented process. Based on the action network and operating machine's functional diagram, the diagram of different states is determined, which graphically shows changes of the control system's input and output signals. Analysis of the diagram of different states, makes it easy to determine a schematic equation, which shall be the basis for the control system implementation. Advantage of the MTS method is the lack of restrictions on the number of the control system's input and output signals. The resulting solution is characterized by a minimum number of elements needed to implement the control system.