

Jerzy MIKULSKI

## ANALIZA MATEMATYCZNA PRZEKAŹNIKOWEGO SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM JAKO BAZA MODELU DYDAKTYCZNEGO PRACY URZĄDZEŃ

**Streszczenie.** Przedstawiana praca zawiera analizę matematyczną przekąźnikowego systemu sterowania ruchem kolejowym na stacji, przydatną przy modelowaniu takiego systemu. Efektem analizy procesów jest oprogramowanie umożliwiające symulację pracy dowolnego przekąźnikowego systemu sterowania ruchem kolejowym. Tak zrealizowana symulacja umożliwia pełne zrozumienie zasad działania i projektowania przekąźnikowego systemu sterowania ruchem, a osiąga się to dzięki możliwości wprowadzania dowolnego zestawu schematów oraz krokowego śledzenia pracy systemu.

## MATHEMATICAL ANALYSIS OF RELAY INTERLOCKING SYSTEM AS A BASE OF A DIDACTIC MODEL OF A RAILWAY TRAFFIC CONTROL SYSTEM

**Summary.** Presented paper contains mathematical analysis of relay station interlocking system for railway traffic control that will allow to develop a model of such a system. Analysis of control processes results in a software enabling to simulate any relay system for railway traffic control. Simulation realised in this way enables full presentation of operation and design principles of railway relay interlocking system and gives ability for step by step tracing of operation cycles.

Urządzenia sterowania ruchem kolejowym stanowią wydzieloną gałąź techniczną transportu kolejowego, którego zadaniem jest zapewnienie sprawnego i bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego. System sterowania ruchem kolejowym współpracuje z:

- pulpitem nastawczym, który umożliwia przyjmowanie przez system rozkazów wydanych przez dyżurnego ruchu,
- planem świetlnym, który informuje o stanie urządzeń zewnętrznych i zależnościowych,
- urządzeniami zewnętrznymi znajdującymi się w terenie, przy czym urządzenia te można podzielić na dwie grupy:
  - \* urządzenia kontrolowane i sterowane (napędy zwrotnicowe, semafony itp.),
  - \* urządzenia kontrolowane (odcinki izolowane).

W przekaźnikowych urządzeniach sterowania ruchem kolejowym wszystkie zależności realizowane są na drodze elektrycznej. Obwody elektryczne są wzajemnie powiązane za pomocą zestyków przekaźników.

Obwody przekaźnikowe systemu sterowania ruchem kolejowym tworzą sekwencyjny układ przełączający (asynchroniczny) [2].

Symulacja przekaźnikowych układów sterowania wymaga sformułowania opisu formalnego obiektów będących przedmiotem analizy [7] (podobnie jak dla matematycznego opisu układu torowego [3] lub obiektów sterowania ruchem kolejowym [5]). W przypadku przekaźnikowych schematów systemów sterowania ruchem kolejowym obiekty takie można opisać wprowadzając zbiory podstawowych symboli elektrycznych:

\* Zbiór źródeł zasilania:

$$Z = \{z_i \mid i=1,2, \dots, lz\},$$

gdzie:  $lz$  - liczba źródeł zasilania.

\* Zbiór połączeń przewodowych:

$$PP = \{pp_i \mid i=1,2, \dots, lpp\},$$

gdzie:  $lpp$  - liczba połączeń przewodowych.

\* Zbiór łączników (zestyki, których stan wymuszony jest przez tabor, przyciski nastawcze itp.):

$$L = \{l_i \mid i=1,2, \dots, ll\},$$

gdzie:  $ll$  - liczba łączników.

\* Zbiór przekaźników:

$$P = \{p_i \mid i=1,2, \dots, lp\},$$

gdzie:  $lp$  - liczba przekaźników.

Dla każdego przekaźnika można wprowadzić następujące podzbiory opisujące jego konstrukcję:

\* Zbiór uzwojeń:

$$Pu = \{pu_i \mid i=1,2, \dots, lu\},$$

gdzie:  $lu$  - liczba uzwojeń.

\* Zbiór zestyków:

$$Zz = \{zz_i \mid i=1,2, \dots, lzz\},$$

gdzie:  $lzz$  - liczba zestyków.

Stan każdego przekaźnika można opisać za pomocą funkcji logicznej:

$$S(p_i),$$

która przyjmuje wartości:

$$S(p_i) = 1 \Leftrightarrow \text{przekaźnik wzbudzony},$$

$$S(p_i) = 0 \Leftrightarrow \text{przekaźnik odwzbudzony}.$$

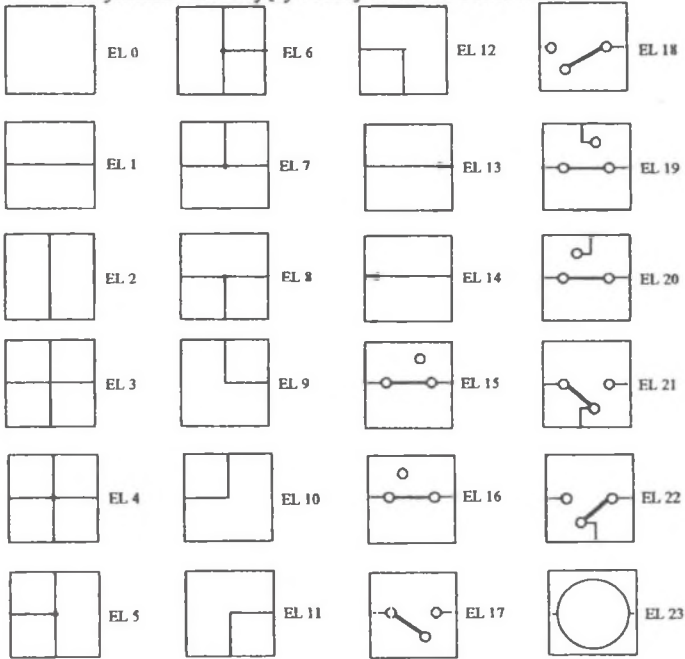
Na podstawie przedstawionego opisu powstaje opis symboli stosowanych w przekaźnikowych układach sterowania ruchem kolejowym. Symbole elementów schematu, które okazały się niezbędne dla projektowania obwodów przekaźnikowych, przedstawia rys 1.

Symbole wykorzystywane do projektowania schematów mogą być reprezentowane przez zbiór symboli:

$$EL = \{el_{id} \mid id=1,2, \dots, d\},$$

gdzie:  $d$  - liczba symboli,

$id$  - identyfikator określający rodzaj elementu schematu.



Rys. 1. Symbole elementów schematu  
Fig. 1. Symbols of scheme elements

Elementy schematu można podzielić na grupy elementów o podobnych parametrach. Grupy te tworzą podzbiory zbioru EL:

\* Zbiór symboli elementów zasilających ELZAS

$$ELZAS = \{elzas_i \mid i=1,2, \dots, nz\},$$

gdzie:  $nz$  - liczba symboli źródeł zasilania:  $nz = 2$ .

Każdy symbol  $elzas_i$  jest skojarzony z dowolnym źródłem zasilania.

W skład zbioru ELZAS wchodzi elementy EL13, EL14.

\* Zbiór symboli połączeń przewodowych ELPW

$$ELPW = \{elpw_i \mid i=1,2, \dots, npw\},$$

gdzie:  $npw$  - liczba symboli połączeń przewodowych:  $npw = 6$ .

Każdy symbol  $elpw_i$  jest skojarzony z fizycznym połączeniem.

W skład zbioru ELPW wchodzi elementy: EL1, EL2, EL9 ... EL12.

- \* Zbiór symboli rozgałęzień przewodów ELPŁ

$$ELPŁ = \{elp_i \mid i=1,2, \dots, np\},$$

gdzie: np - liczba symboli rozgałęzień przewodów: np = 5.  
Każdy symbol  $elp_i$  jest skojarzony z fizycznym połączeniem.  
W skład zbioru ELPŁ wchodzi elementy EL4 ... EL8.

- \* Zbiór symboli zestyków ELS

$$ELS = \{els_i \mid i=1,2, \dots, ns\},$$

gdzie: ns - liczba symboli zestyków (lub łączników): ns = 8.  
Każdy symbol  $els_i$  jest skojarzony z zestykiem lub łącznikiem.  
W skład zbioru ELS wchodzi elementy: EL15 ... EL22.

- \* Zbiór symboli przekaźników ELPK (jednoelementowy).

W skład zbioru ELPK wchodzi element EL23.

- \* Zbiór symboli przecięć przewodów ELPPW (jednoelementowy).

W skład zbioru ELPPW wchodzi element EL3.

- \* Zbiór symboli pustych  $EL\emptyset$  (jednoelementowy).

W skład zbioru  $EL\emptyset$  wchodzi element ELO.

Schemat elektryczny w ujęciu matematycznym (podobnie jak przy projektowaniu planu świetlnego [6]) można traktować jako macierz dwuwymiarową, w której zakres indeksów wynika z liczby symboli umieszczonych na schemacie. Każdy symbol  $el_{id}$  umieszczony na planie jest określony jednoznacznie za pomocą macierzy:

$$SCH = [sch_{xy}],$$

gdzie:  $x = 1,2, \dots, m,$

$y = 1,2, \dots, n,$

$m$  - szerokość schematu,

$n$  - wysokość schematu,

której elementy przyjmują odpowiednio wartości:

$$sch_{xy} = el_{id}.$$

Dodatkowo wprowadza się funkcję  $Nr(sch_{xy})$  określającą numer kolejny symbolu schematu  $sch_{xy}$  umieszczonego w macierzy SCH:

$$Nr(sch_{xy}) = (y-1)*m+x,$$

gdzie:  $x, y$  - współrzędne symbolu schematu  $sch_{xy}$  w macierzy SCH,

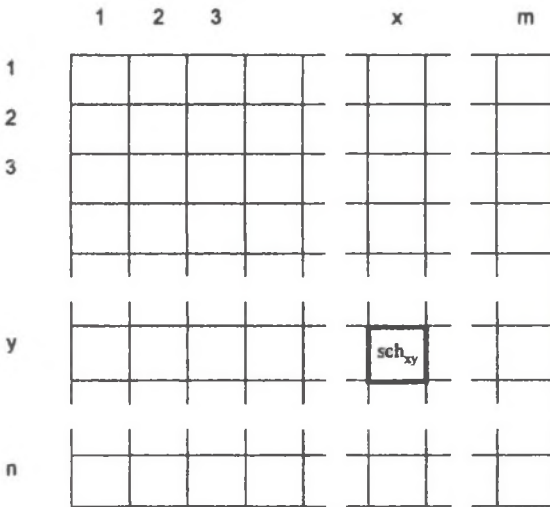
$x = 1,2, \dots, m,$

$y = 1,2, \dots, n,$

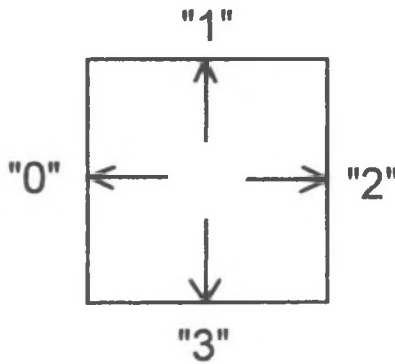
$m, n$  - rozmiar macierzy SCH.

Sposób określania położenia symbolu na schemacie oraz jego numeru przedstawia rys. 2.

W przedstawionym modelu schematów przekaźnikowych przyjęto, że każdy symbol elementu elektrycznego zawierający przewody doprowadzeniowe może być "połączony" z innym symbolem tylko przez cztery charakterystyczne punkty wskazane na rys. 3 (środek jednego z czterech boków), a nazywane dalej punktami połączenia.



Rys. 2. Sposób określania położenia symboli na schemacie  
 Fig. 2. The way of determination of symbol placement on the scheme



Rys. 3. Oznaczanie boków symboli schematu  
 Fig. 3. Markings of scheme symbols sides

Istnienie połączenia między symbolami elektrycznymi można opisać funkcją logiczną:

$$PL(e^{b_{id}})$$

dla  $b = 0 \dots 3$

$id = 0 \dots 23$

gdzie:  $b$  - dodatkowo wprowadzony indeks (występujący dalej tylko wtedy, gdy konieczne jest określenie punktu połączenia elementu), określający umowny numer punktu połączenia symbolu schematu  $e^{b_{id}}$ ,  
 $id$  - identyfikator elementu schematu,

która przyjmuje odpowiednio wartości:

$$\begin{aligned} \text{PŁ}(el^b_{id}) = 1 &\Leftrightarrow \text{może istnieć połączenie symbolu } el_{id} \\ &\text{z innym symbolem przez bok "b",} \\ \text{PŁ}(el^b_{id}) = 0 &\Leftrightarrow \text{nie może istnieć połączenie symbolu } el_{id} \\ &\text{z innym symbolem przez bok "b".} \end{aligned}$$

Przy takim założeniu zbiór możliwych połączeń każdego elementu schematu  $el_{id}$  z sąsiednim można opisać za pomocą funkcji połączeń:

$$\text{WP}(el_{id}),$$

której wartości wynikają z binarnej reprezentacji wartości funkcji  $\text{PŁ}(el^b_{id})$  dla kolejnych boków  $b = 0 \dots 3$ :

- bit 0  $\text{PŁ}(el^0_{id})$
- bit 1  $\text{PŁ}(el^1_{id})$
- bit 2  $\text{PŁ}(el^2_{id})$
- bit 3  $\text{PŁ}(el^3_{id})$

Istnienie połączenia wewnątrz elementu typu zestyk (EL12 ... EL22) można opisać za pomocą dwóch funkcji logicznych:

$\text{PŁWO}(el^b_{id})$  - opisująca połączenia występujące wewnątrz elementu, gdy zestyk jest odwzbudzony,

$\text{PŁW1}(el^b_{id})$  - opisująca połączenia występujące wewnątrz elementu, gdy zestyk jest wzbudzony,

$$\begin{aligned} \text{dla } b &= 0 \dots 3 \\ \text{id} &= 15 \dots 22 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PŁWO}(el^b_{id}) = 1 &\Leftrightarrow \text{gdy bok "b" bierze udział w połączeniu elektrycznym} \\ &\text{realizowanym przez odwzbudzony zestyk,} \\ \text{PŁWO}(el^b_{id}) = 0 &\Leftrightarrow \text{gdy bok "b" nie bierze udziału w połączeniu} \\ &\text{elektrycznym realizowanym przez odwzbudzony zestyk,} \\ \text{PŁW1}(el^b_{id}) = 1 &\Leftrightarrow \text{gdy bok "b" bierze udział w połączeniu elektrycznym} \\ &\text{realizowanym przez wzbudzony zestyk,} \\ \text{PŁW1}(el^b_{id}) = 0 &\Leftrightarrow \text{gdy bok "b" nie bierze udziału w połączeniu} \\ &\text{elektrycznym realizowanym przez wzbudzony zestyk.} \end{aligned}$$

Dla zestyku zwierne go funkcja  $\text{PŁWO}(el^b_{id})$  jest równa zero dla każdego boku "b", ponieważ element nie realizuje żadnego połączenia między bokami, gdy jest odwzbudzony.

Dla zestyku rozwiernego funkcja  $\text{PŁW1}(el^b_{id})$  jest równa zero dla każdego boku "b", ponieważ element nie realizuje żadnego połączenia między bokami, gdy jest wzbudzony.

Przy takim założeniu zbiór możliwych połączeń realizowanych przez zestyk można opisać za pomocą funkcji połączeń:

$$\text{WPW}(el_{id}),$$

której wartości wynikają z binarnej reprezentacji wartości funkcji  $PŁWO(e^b_{id})$  oraz  $PŁW1(e^b_{id})$  dla kolejnych boków  $b = 0 \dots 3$ :

- bit 0  $PŁWO(e^0_{id})$
- bit 1  $PŁWO(e^1_{id})$
- bit 2  $PŁWO(e^2_{id})$
- bit 3  $PŁWO(e^3_{id})$
- bit 4  $PŁW1(e^0_{id})$
- bit 5  $PŁW1(e^1_{id})$
- bit 6  $PŁW1(e^2_{id})$
- bit 7  $PŁW1(e^3_{id})$

Wszystkie umieszczane na schemacie symbole muszą być jednoznacznie opisane, aby umożliwić przetwarzanie danych dla procedur tworzących struktury sieciowe, generatora tablic implikantów oraz modułu symulacyjnego. Każdy z symboli występujących na schemacie musi więc mieć odpowiednie atrybuty umożliwiające jednoznaczne określenie jego typu i położenia oraz rodzaju przekazywanej informacji [7] (podobnie jak dla układu torowego [3] lub planu świetlnego [6]).

Każdy element macierzy SCH (symbol umieszczony na schemacie) jest opisany za pomocą atrybutów stałych i zmiennych.

Atrybuty stałe są przydzielane symbolom przed ich umiejscowieniem na schemacie w zależności od ich typu oraz położenia i nie ulegają zmianie w trakcie procedur przetwarzania. Do atrybutów stałych należą:

- identyfikator (id) określający typ symbolu o wartościach zgodnych z numerami symboli podanymi na rys. 1,
- funkcja połączeń WP( $e_{id}$ ),
- funkcja połączeń wewnętrznych WPW( $e_{id}$ ) - tylko dla elementów typu zestyk.

Atrybuty zmienne są tworzone (lub modyfikowane) na etapie projektowania schematu w celu rozróżnienia symboli tego samego typu. Liczba i rodzaje atrybutów zmiennych zależą od typu elementów przedstawionych symbolicznie. W ten sposób można określić zbiory atrybutów zmiennych dla:

\* przekąźnika:

- nazwa przekąźnika,
- czas wzbudzenia,
- czas odwzbudzenia,
- funkcja opisująca stan przekąźnika,
- funkcja informująca o wymaganej zmianie stanu przekąźnika (dla przekąźników ze zwłoką),

\* zestyków:

- nazwa zestyku,
- funkcja opisująca stan zestyku przekąźnika.

Ze względu na dużą liczbę schematów występujących w systemie sterowania ruchem kolejowym, odpowiadający mu model matematyczny ma strukturę warstwową, to znaczy

każdy schemat stanowi jedną z warstw reprezentowaną przez macierz SCH. Po przyporządkowaniu nazwy porządkowej każdej warstwie (nazwy schematu znajdującego się w danej warstwie) możliwe jest utworzenie listy schematów występujących w systemie:

$$\text{WAR} = \text{war}_f,$$

gdzie  $\text{war}_f$  - nazwa porządkowa schematu przedstawionego przez warstwę  $f$ ,

$$f = 1, 2 \dots \text{lsch},$$

lsch - liczba schematów w systemie.

Kompletny system sterowania ruchem kolejowym może zostać opisany za pomocą listy warstw systemu WAR oraz odpowiadających im macierzy SCH, przedstawiających dane schematy.

Sieć schematu elektrycznego ma specyficzną strukturę - każdy węzeł może mieć połączenie co najwyżej z czterema węzłami (liczba krawędzi przyległych do dowolnego węzła może wynosić maksymalnie cztery). Efektywnym rozwiązaniem opisu sieci, których liczba połączeń między węzłami jest stosunkowo mała, jest wykorzystanie listy krawędzi [4]. Dodatkowo za takim przedstawieniem sieci przemawia fakt, że podczas analizy matematycznej sieć będzie ulegać zmianom - z sieci będą usuwane węzły.

Najkorzystniejszym sposobem implementacji listy krawędzi jest przedstawienie jej w postaci macierzy:

$$\text{POŁ} = [\text{poł}_{pq}],$$

gdzie  $p = 1, 2 \dots \text{lk}$ ,

lk - liczba krawędzi,

$$q = 1, 2, 3,$$

której elementy o tym samym pierwszym indeksie opisują kolejno początek, koniec oraz wagę krawędzi.

Para elementów macierzy  $\text{poł}_{pq}$  o tym samym pierwszym indeksie oznacza istnienie krawędzi pomiędzy symbolem schematu  $\text{sch}_{x_1y_1}$  a symbolem schematu  $\text{sch}_{x_2y_2}$ :

$$\text{poł}_{p1} = \text{Nr}(\text{sch}_{x_1y_1}),$$

$$\text{poł}_{p2} = \text{Nr}(\text{sch}_{x_2y_2}),$$

gdzie  $\text{Nr}(\text{sch}_{xy})$  jest funkcją określającą numer kolejny symbolu schematu  $\text{sch}_{xy}$  umieszczonego w macierzy SCH.

Dodatkowo wprowadzony trzeci element tablicy  $\text{poł}_{p3}$  oznacza wagę połączenia równą numerowi boku symbolu  $\text{sch}_{x_1y_1}$ , przez który łączy się on z symbolem  $\text{sch}_{x_2y_2}$ :

$$\text{poł}_{p3} = b,$$

gdzie  $b = 0 \dots 3$ .

Tworzenie listy krawędzi przebiega tak, że dla każdego elementu schematu, który nie jest elementem pustym, sprawdzane są połączenia z elementami sąsiednimi. W przypadku gdy takie połączenie istnieje, jest ono zapisywane do macierzy POŁ.

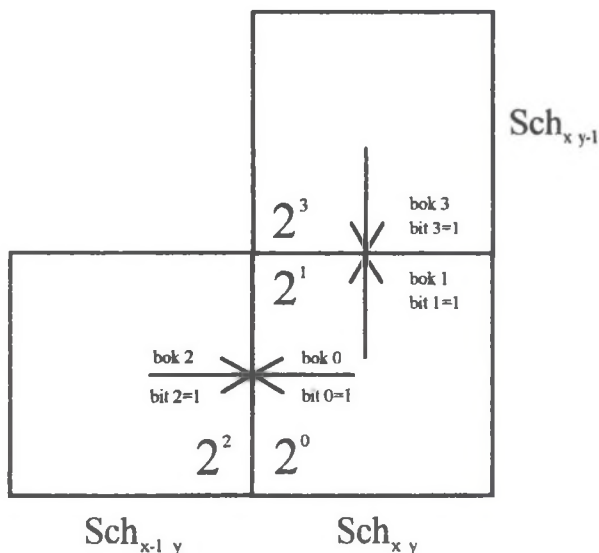


Element schematu  $sch_{xy}$  (rys. 4) ma połączenie z elementem znajdującym się z jego lewej strony  $sch_{x-1,y}$ , gdy funkcja połączeń  $WP(e_{i,d})$  spełnia następujący warunek:

$$\bigwedge_{\substack{sch_{xy} \\ x = 2..m \\ y = 1..n}} WP^{sch_{xy}}(e_{i,d}) \wedge 2^0 = WP^{sch_{x-1,y}}(e_{i,d}) \wedge 2^2$$

Elementy macierzy POŁ opisujące to połączenie mają następującą postać:

$$\begin{aligned} pol_{p1} &= Nr(sch_{xy}) \\ pol_{p2} &= Nr(sch_{x-1,y}) \\ pol_{p3} &= 0 \text{ (połączenie przez bok 0)} \end{aligned}$$



Rys. 4. Warunek istnienia połączenia pomiędzy elementami  $sch_{xy}$ ,  $sch_{x-1,y}$ ,  $sch_{x,y-1}$   
 Fig. 4. Condition for existence a connection between elements  $sch_{xy}$ ,  $sch_{x-1,y}$ ,  $sch_{x,y-1}$

Element schematu  $sch_{xy}$  ma połączenie z elementem znajdującym się nad nim  $sch_{x,y-1}$ , gdy funkcja połączeń  $WP(e_{i,d})$  spełnia następujący warunek:

$$\bigwedge_{\substack{sch_{xy} \\ x = 1..m \\ y = 2..n}} WP^{sch_{xy}}(e_{i,d}) \wedge 2^1 = WP^{sch_{x,y-1}}(e_{i,d}) \wedge 2^3$$

Elementy macierzy POŁ opisujące to połączenie mają następującą postać:

$$\begin{aligned} \text{poł}_{p_1} &= \text{Nr}(\text{sch}_{xy}) \\ \text{poł}_{p_2} &= \text{Nr}(\text{sch}_{x,y-1}) \\ \text{poł}_{p_3} &= 1 \quad (\text{połączenie przez bok 1}) \end{aligned}$$

Element schematu  $\text{sch}_{xy}$  ma połączenie z elementem znajdującym się z jego prawej strony  $\text{sch}_{x+1,y}$ , gdy funkcja połączeń  $\text{WP}(el_{id})$  spełnia następujący warunek:

$$\begin{aligned} \bigwedge_{\text{sch}_{xy}} \text{WP}^{\text{sch}_{xy}}(el_{id}) \wedge 2^2 &= \text{WP}^{\text{sch}_{x+1,y}}(el_{id}) \wedge 2^0 \\ x &= 2..m-1 \\ y &= 1..n \end{aligned}$$

Elementy macierzy POŁ opisujące to połączenie mają następującą postać:

$$\begin{aligned} \text{poł}_{p_1} &= \text{Nr}(\text{sch}_{xy}) \\ \text{poł}_{p_2} &= \text{Nr}(\text{sch}_{x+1,y}) \\ \text{poł}_{p_3} &= 2 \quad (\text{połączenie przez bok 2}) \end{aligned}$$

Element schematu  $\text{sch}_{xy}$  ma połączenie z elementem znajdującym się pod nim  $\text{sch}_{x,y+1}$ , gdy funkcja połączeń  $\text{WP}(el_{id})$  spełnia następujący warunek:

$$\begin{aligned} \bigwedge_{\text{sch}_{xy}} \text{WP}^{\text{sch}_{xy}}(el_{id}) \wedge 2^3 &= \text{WP}^{\text{sch}_{x,y+1}}(el_{id}) \wedge 2^1 \\ x &= 1..m \\ y &= 1..n-1 \end{aligned}$$

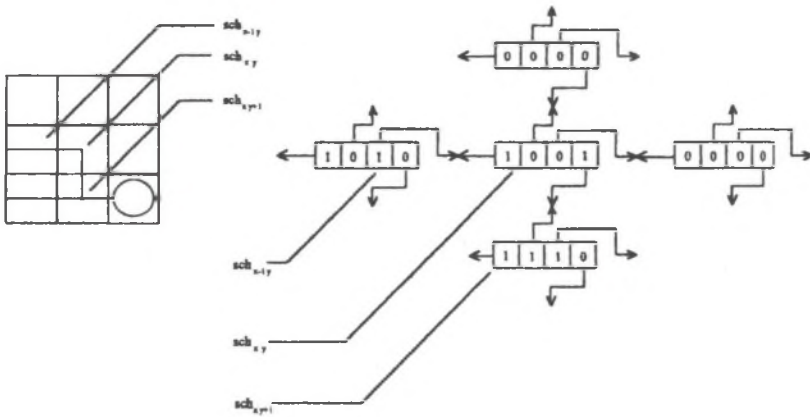
Elementy macierzy POŁ opisujące to połączenie mają następującą postać:

$$\begin{aligned} \text{poł}_{p_1} &= \text{Nr}(\text{sch}_{xy}) \\ \text{poł}_{p_2} &= \text{Nr}(\text{sch}_{x,y-1}) \\ \text{poł}_{p_3} &= 3 \quad (\text{połączenie przez bok 3}) \end{aligned}$$

Przykładowo (rys.5) symbol przedstawiający element EL12 ma połączenie z elementami  $\text{sch}_{x-1,y}$  (z jego lewej strony) oraz  $\text{sch}_{x,y+1}$  (pod nim). Dla tego fragmentu schematu funkcja  $\text{WP}(el_{id})$  przyjmuje odpowiednio wartości:

$$\begin{aligned} \text{WP}^{\text{sch}_{xy}}(el_{12}) &= [1001] \\ \text{WP}^{\text{sch}_{x-1,y}}(el_1) &= [1010] \\ \text{WP}^{\text{sch}_{x,y-1}}(el_0) &= [0000] \\ \text{WP}^{\text{sch}_{x,y+1}}(el_0) &= [0000] \\ \text{WP}^{\text{sch}_{x,y+1}}(el_7) &= [1110] \end{aligned}$$

Na rys. 5 przedstawiono także znaczenie poszczególnych bitów binarnej reprezentacji wartości funkcji  $\text{WP}^{\text{sch}_{xy}}(el_{id})$ . Połączenie pomiędzy elementami występuje, gdy obydwie łączące się strzałki mają początek w polu z jedyneką.



Rys. 5. Fragment schematu oraz odpowiadające mu wartości funkcji  $WP^{sch_w}(el_{i,d})$   
 Fig. 5. Fragment of a scheme and respective values of a function  $WP^{sch_w}(el_{i,d})$

Utworzona w ten sposób lista krawędzi POŁ opisuje sieć SSCH schematu elektrycznego:  
 $SSCH = (WSCH, ESCH)$

gdzie WSCH - zbiór węzłów sieci

$$WSCH = \{ wsch_g \mid g = 1, 2, \dots, lwsch \}$$

lwsch - liczba elementów niepustych macierzy SCH

$$wsch_g = sch_{xy}$$

$x = 1, 2, \dots, m$

$y = 1, 2, \dots, n$

$m, n$  - rozmiar macierzy SCH

ESCH - zbiór krawędzi sieci

$$ESCH = \{ esch_h \mid h = 1, 2, \dots, lk \}$$

lk - liczba krawędzi sieci, równa liczbie elementów listy krawędzi POŁ.

W ten sposób struktura schematu elektrycznego została opisana za pomocą zbioru SSCH, natomiast informacje o węzłach sieci opisane są przez odpowiednie wektory atrybutów.

Otrzymana sieć opisana za pomocą listy krawędzi jest mało "ekonomiczna", ponieważ każdemu elementowi schematu odpowiada węzeł sieci. Istnieje możliwość zredukowania sieci przez wyeliminowanie z niej węzłów biernych, to znaczy takich, które realizują połączenie między sąsiednimi węzłami, nie spełniając żadnych dodatkowych funkcji.

Zredukowanie sieci polega na przekształceniu sieci SSCH w sieć zredukowaną ZSCH, taką że:

$$ZSCH = (WASCH, EZSCH),$$

gdzie WASCH - zbiór węzłów aktywnych,

EZSCH - zbiór krawędzi sieci zredukowanej,

$$EZSCH = \{ ezsch_h \mid h = 1, 2, \dots, lezsch \},$$

lezsch - liczba krawędzi sieci zredukowanej.

Przekształcenie zbioru krawędzi sieci niezredukowanej ESCH w zbiór krawędzi sieci zredukowanej EZSCH musi zostać przeprowadzone w taki sposób, aby zachowana została struktura schematu, to znaczy aby połączenia występujące pomiędzy węzłami aktywnymi sieci SSCH, realizowane przez węzły biernie, były realizowane przez nowo utworzone krawędzie sieci zredukowanej.

Węzłami biernymi sieci są te węzły, które przedstawiają wyłącznie połączenia pomiędzy dwoma innymi węzłami: elementy EL1, EL2, EL9 ... EL12 zbioru ELPW oraz element EL3 zbioru ELPPW.

Do komputerowej implementacji funkcji stanów przekażników można wykorzystać metodę przeglądania tablic. Podyktowane jest to uniwersalnością metody pozwalającą na opis dowolnej funkcji logicznej (jedynym ograniczeniem jest rozmiar tablicy). Wadą metody jest relatywnie długi czas pracy procedury, zależny od wielkości tablicy implikantów (czyli od liczby implikantów oraz od wielkości słowa wejściowego) oraz duży obszar pamięci zajmowany przez tablicę. Nie mniej, z uwagi na krokowy sposób prowadzenia symulacji działania systemu sterowania ruchem kolejowym w tym przypadku nie jest wymagana duża szybkość działania metody.

Dla wszystkich przekażników występujących w systemie sterowania ruchem kolejowym utworzona zostaje tablica implikantów. Tablicę tę opisać można za pomocą listy tablic postaci:

$$TAB = [tab_i],$$

gdzie  $tab_i$  jest zbiorem macierzy:

$$tab_i = \{M_i, I_i\}$$

$i = 1, 2 \dots lp$

$lp$  - liczba przekażników w systemie sterowania ruchem kolejowym

$$M_i = [m_{kl}]$$

$$I_i = [i_{kl}]$$

$k$  - numer implikantu,

$l$  - numer zmiennej.

Wiersze macierzy  $M$  oraz  $I$  tworzą parę wektorów opisujących implikant:

- wektor maski informujący o tym, które zmienne logiczne występują w implikancie:

$m_{kl} = 1 \Leftrightarrow$  gdy w implikancie występuje zestyk przedstawiony przez zmienną logiczną,

$m_{kl} = 0 \Leftrightarrow$  gdy w implikancie nie występuje zestyk przedstawiony przez zmienną logiczną,

- wektor stanu impliakntu informujący o tym, które zmienne logiczne występujące w implikancie są zanegowane:

$i_{kl} = 1 \Leftrightarrow$  gdy w implikancie występuje zestyk zwierny przedstawiony przez zmienną logiczną,

$i_{kl} = 0 \Leftrightarrow$  gdy w implikancie występuje zestyk rozwierny przedstawiony przez zmienną logiczną.

Do utworzenia tablic implikantów funkcji stanów przekażników można wykorzystać metodę przeszukiwania zstępującego z powrotami [9]. Metoda ta umożliwi systematyczne przeglądanie wszystkich węzłów i połączeń sieci. Pozwala to na przejście całej sieci przedstawiającej schemat i zapamiętanie wszystkich ścieżek tworzących implikanty funkcji stanu przekażnika.



- ścieżka zawiera zestyk przełączny, który jest połączony z sąsiednimi węzłami przez boki, które nie mogą realizować połączenia elektrycznego,
- ścieżka zawiera parę zestyków  $p$  i  $\bar{p}$  tego samego przełącznika:

$$p * \bar{p} = 0$$

Sytuacja taka występuje, gdy w skład ścieżki wchodzi zestyki zwiernie i rozwiernie tego samego przełącznika. Konieczne jest także wyeliminowanie podobnej sytuacji dla zestyków przełącznych, które w dalszej analizie zastąpione zostają zestykami zwiernymi i rozwiernymi. Zestyk przełączny może być traktowany jako zwierny lub rozwierny, a uzależnione jest to od wagi krawędzi  $b_1$ ,  $b_2$  łączących dany węzeł z węzłami sąsiednimi. Zależność tę przedstawia tabela 1.

Tabela 1  
Zastąpienie zestyku przełącznego zestykiem  
zwiernym lub rozwiernym

Identyfikator	Waga krawędzi		Rodzaj zestyku
	$b_1$	$b_2$	
EL 19	0	1	zwierny
	1	0	zwierny
	0	2	rozwierny
	2	0	rozwierny
EL 20	1	2	zwierny
	2	1	zwierny
	0	2	rozwierny
	2	0	rozwierny
EL21	0	2	zwierny
	2	0	zwierny
	0	3	rozwierny
	3	0	rozwierny
El 22	0	2	zwierny
	2	0	zwierny
	1	3	rozwierny
	3	1	rozwierny

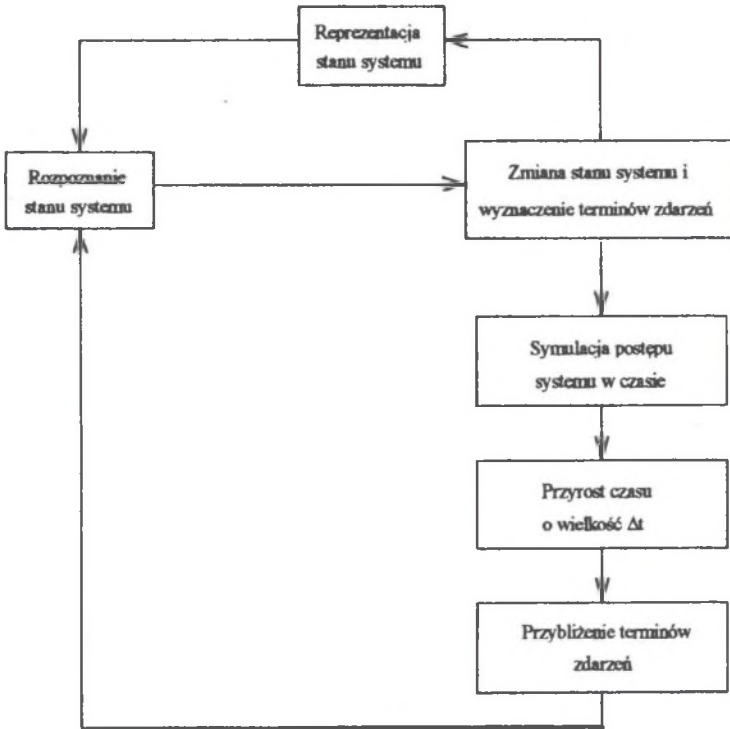
W przypadku gdy spełnione są wymienione warunki, w tablicy umieszczony zostaje element przedstawiający implikant.

Opis funkcjonowania systemu nie może jeszcze w sposób bezpośredni służyć do rzeczywistego odtwarzania jego zachowania się na komputerze. Pojęcie symulacji związane jest zawsze z dynamicznym wykorzystaniem modelu, obejmując generowanie oraz analizę zachowania się systemu. W celu otrzymania informacji o działaniu symulowanego systemu konieczne jest przeprowadzenie procesu symulacyjnego.

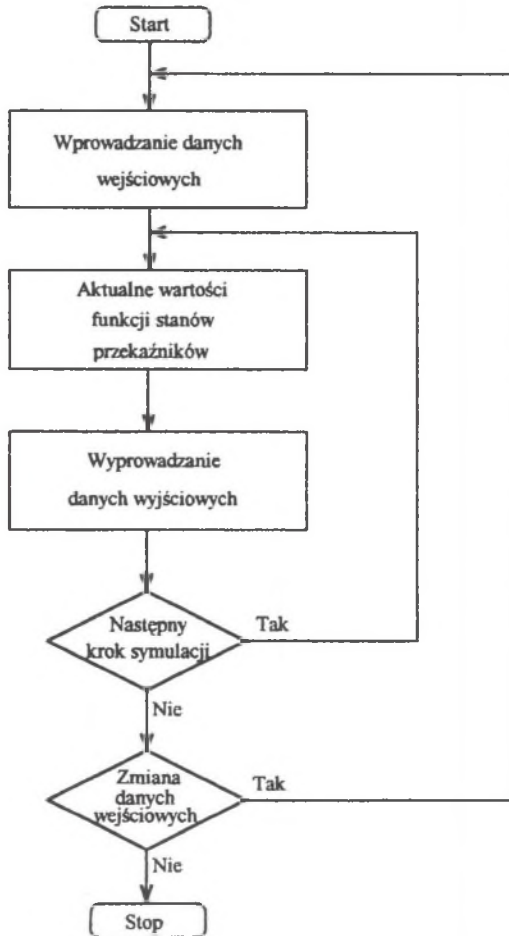
Ideę procesu symulacji przedstawiono w sposób uproszczony na rys. 7. Proces ten przebiega w sposób cykliczny i dwufazowy. Pierwsza faza cyklu symulacyjnego polega na rozpoznaniu stanu systemu. Następnie sprawdzane są zależności mogące powodować zmiany stanu.

W drugiej fazie wykonana zostaje symulacja upływu czasu. Cykle procesu symulacyjnego są powtarzane aż do chwili uzyskania dostatecznej informacji o zachowaniu się systemu.

W przedstawianym symulatorze pracy urządzeń sterowania ruchem kolejowym przyjęto koncepcję nieregularnych (zależnych od stanu systemu) przyrostów czasu [1]. Oznacza to, że każdorazowy "postęp" systemu w czasie uzależniony jest od zajścia określonych zdarzeń w symulowanym systemie. Zdarzenia te określają rozpoczęcie, wstrzymanie i zakończenie procesu symulacji i wyznaczają kolejne kroki symulacji umożliwiające analizę działania przekaźnikowego systemu sterowania ruchem kolejowym. Algorytm symulacji przedstawiony jest na rys. 8.



Rys. 7. Przebieg procesu symulacyjnego  
Fig.7. The course of simulating process



Rys. 8. Algorytm symulacji pracy urządzeń sterowania ruchem kolejowym  
 Fig. 8. Work simulation algorithm of the railway traffic control devices

Pierwszym etapem symulacji pracy systemu sterowania ruchem kolejowym [8] jest wprowadzenie danych wejściowych. W ten sposób możliwe jest wprowadzenie dowolnego stanu systemu sterowania ruchem kolejowym. Następnie wyznaczane zostają aktualne stany zmiennych logicznych przedstawiających przekaźniki. Dla każdej zmiennej logicznej przedstawiającej przekaźnik utworzona zostaje tablica implikantów, a na jej podstawie określona zostaje aktualna wartość funkcji stanu przekaźnika. Kolejno uaktualnione zostają atrybuty określające stan elementów schematów systemu sterowania ruchem kolejowym. Dla każdego symbolu schematu przedstawiającego zestyk przekaźnika atrybut określający stan zestyku przyjmuje wartość funkcji stanu przekaźnika (proces aktualizacji przeprowadzany jest dla każdej warstwy).

W ten sposób wykonany zostaje jeden cykl symulacji pracy systemu sterowania ruchem kolejowym. Cykle powtarzane są do momentu ustalenia się stanu systemu (przyjmuje się, że



system sterowania ruchem kolejowym nie jest "generatorem" i po wykonaniu "n" kroków osiąga stan ustalony).

Tak przeprowadzana jest symulacja krokowa, która umożliwiła szczegółową analizę działania systemu sterowania ruchem kolejowym. Możliwa jest także symulacja pracy systemu dla sekwencji danych wejściowych. W takim przypadku omówiony proces powtarzany jest dla każdego stanu zmiennych wejściowych wchodzących w skład sekwencji.

W omawianym modelu symulacyjnym przyjęto, że w układach przełączających nie występują zjawiska hazardu i wyścigu. W układach automatyki kolejowej możliwość wystąpienia hazardu lub wyścigu eliminowana jest już w czasie projektowania systemu. Jednakże wprowadzenie schematu, w którym występuje hazard lub wyścig, nie spowoduje żadnych zakłóceń przebiegu procesu symulacyjnego. Symulator umożliwiła równoczesną zmianę stanu dwóch lub więcej przekąźników, co uniemożliwia wystąpienie wyścigu, a zestyki zwierne i rozzwierne tego samego przekąźnika zmieniają swój stan równocześnie, co eliminuje zjawisko hazardu - symulowany obwód przekąźnikowy zachowuje się więc jak obwód idealny.

Powstałe oprogramowanie [8], umożliwiające symulację dowolnego przekąźnikowego systemu sterowania ruchem kolejowym jest użytecznym narzędziem zarówno przy poznawaniu zasad działania urządzeń sterowania ruchem kolejowym, jak i przy ich projektowaniu. Zastosowanie programu nie ogranicza się tylko do symulacji pracy urządzeń kolejowych - program umożliwia symulację dowolnego układu przełączającego, co pozwala na wykorzystanie go do nauki podstaw automatyki cyfrowej (układy kombinacyjne i sekwencyjne).

## Literatura

1. Kondratowicz L.: Modelowanie symulacyjne systemów. WNT, Warszawa 1978.
2. Mikulski J.: Asynchroniczne układy sekwencyjne, w "Laboratorium Podstaw Automatyki i Telemechaniki", Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1205, Gliwice 1985.
3. Mikulski J., Zych K.: Model matematyczny układu torowego. Zeszyty Naukowe - Techniczne Oddziału Krakowskiego SITK nr 24, Kraków 1992.
4. Mikulski J., Zych K.: Model sieciowy układu torowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport nr 23, Gliwice 1994.
5. Mikulski J., Zych K.: Opis formalny obiektów sterowania ruchem kolejowym. *ibid.*
6. Mikulski J., Zych K.: Projektowanie uniwersalnego planu świetlnego stacji. *ibid.*
7. Mikulski J.: Simulation of operation of relay devices in a railway traffic control system (didactic model). Proceedings International AMSE Conference "SYS'94", Lyon 1994.
8. Mikulski J.: Symulacja pracy obwodów sterowania ruchem kolejowym. Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1938, Gliwice 1995.
9. Reingold E. M. i inni: Algorytmy kombinatoryczne. PWN, Warszawa 1976.

Recenzent: Doc. dr inż. Zbigniew Ginalski

**Abstract**

Railway signalling equipment (interlocking) is a separated technical branch of a railway transportation. The objective of interlocking equipment is to secure efficient and safe railway traffic and to enable competent management and carriage control.

Presented study contains mathematical analysis of a relay station interlocking system enabling realisation of model of such a system. The result of control processes analysis is software enabling operation simulation of any relay interlocking system. Simulation software gives ability for step by step tracing of operation cycles of railway interlocking system.

In this analysis there is possible any "manual" entering of data (for example states of press-buttons) and automatic entering of data, which is a result from rolling stock influence on the railway interlocking devices (for example checked sections) and following up of elements operation on the system scheme. There appears on the screen a window containing information about names of logical variables present in the schemes, which are included into railway interlocking system and about a states (activated/deactivated). Then the programme checks the implicant tables and depending on a state of system input elements the state of system is modified (output data).