ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969
Seria: AUTOMATYKA z. 14 Nr kol. 267

Dr inż. Antoni Pach
Katedra Automatyki
i Elektroniki Przemysłowej
Akademii Górniczo-Hutniczej
w Krakowie

3.2. MOŻLIWOŚĆ ELIMINOWANIA DYNAMICZNEJ ZAWODNOŚCI STRUKTURALNEJ PRZY POMOCY ROZSZERZONEJ MATRYCY STANÓW

Streszczenie. Znalezienie dogodnej metody identyfikacji oraz eliminacji zawodności strukturalnej dynamicznej (dynamic hazard) jest ciągle jeszcze sprawą otwartą. Proponuje się rozwiązanie tego problemu przy pomocy specjalnej matrycy stanów, będącej rozszerzeniem matrycy M. Karnaugha. Rozszerzona matryca stanów daje możliwość badania układów przekaźnikowych nie tylko w stanach stabilnych (stan pracy, stan spoczynku) lecz również i w stanach przejściowych, występujących podczas przejścia układu ze stanu pracy w stan spoczynku i vice versa.

Rozszerzona matryca stanów umożliwia też bardzo dogodne identyfikowanie oraz eliminowanie zawodności strukturalnej statycznej (static hazard), przy czym eliminacja tej zawodności wspomnianą matrycą, daje zdaniem autora lepsze rezultaty, niż metodą D.A. Huffmana.

Zaproponowana metoda może być dogodnym i prostym narzędziem w ręku inżyniera, dla zapewnienia w pewnym zakresie niezawodnej pracy układu przekaźnikowego.

Zwrócono także uwagę na terminologię polską stosowaną w teorii układów przekaźnikowych, wysuwając przy tym pewne propozycje, które oczywiście należy traktować jako dyskusyjne.

1. Wstęp

Termin zawodność strukturalna zaproponowany przez autora [1] dla oznaczenia słowa "hazard" użytego przez D.A. Hoffmana [2] a dotyczącego zachowania się stykowego układu przełączającego podczas jego przejścia ze stanu spoczynku do stanu pracy i na odwrót. Każdy fizyczny układ przełączający, przejście to realizuje w czasie. Niezależnie od wartości tego czasu, nie można

przy dokonywaniu syntezy układu pomijać jego istnienia. W wielu bowiem przypadkach może się bowiem okazać, że układ, którego synteza została poprawnie przeprowadzona, może działać zawodnie z powodu nieuwzględnienia występowania stanu trzeciego, podczas przejścia układu z jednego stanu stabilnego do drugiego stanu stabilnego. Stan pracy układu stykowego oraz stan jego spoczynku zaproponowano nazwać stanami aktywnymi [1], zaś stany układu przyjmowane przez niego podczas przejścia z jednego stanu aktywnego do drugiego stanu aktywnego, stanami nieaktywnymi. W związku z tym określamy pracę idealną układu przełączającego jako pracę, w której nie uwzględniono stanów nieaktywnych. Natomiast praca rzeczywista to taka praca, w której bierze się pod uwagę stany nieaktywne. Na problem ten, szczególnie ważny dla praktyki, zwrócono uwagę w piśmiennictwie polskim nie tak dawno [3], [4].

Przez zawodność strukturalną będziemy rozumieli takie działanie stykowego układu przełączającego, które powoduje chwilową zmianę jego stanu wyjścia, przy zmianie tylko jednej zmiennej wówczas, gdy nie powinno ono być zmienione. Zakładamy przy tym, że synteza układu dla stanów aktywnych została poprawnie przeprowadzona. Termin zawodność strukturalna lepiej oddaje sens fizyczny przyczyny powodującej powstanie zawodnego działania układu, niż słowo "hazard", dosłownie wzięte z piśmiennictwa w języku angielskim. Należy zaznaczyć, że terminologia dotycząca tego pojęcia nie jest ustalona w skali międzynarodowej.

D.A. Huffman sformułował we wspomnianej już pracy [2] pojęcie "hazardu statycznego" oraz "dynamicznego". Konsekwentnie proponuje się teraz termin polski statyczna zawodność strukturalna (SZS) oraz dynamiczna zawodność strukturalna (DZS). Jeśli warunkiem koniecznym do wystąpienia SZS jest obecność w układzie zestyku przełącznego, to pojawienie się DZS warunkowane jest jeszcze dodatkowo obecnością zestyku zwiernego lub rozwiernego tego samego przekaźnika.

Do analizy tego problemu stosuje się aparat logiki formalnej tak dwuwartościowej, np. [2], [5] jak i trójwartościowej, np. [4], [6], czy też teorię ciał skończonych Galois, np. [4].

Można także zastosować metodę graficzną zaproponowaną przez M. Karnaugha [7] dla celów syntezy i minimalizacji układów kombinacyjnych. Metoda ta jest bardzo dogodna do stosowania w praktyce inżynierskiej, zwłaszcza dla przypadków, gdy działanie układu da się opisać przy pomocy funkcji Boole'a kilku zmiennych.

2. Rozszerzona matryca stanów

Z uwagi na niezawodność pracy układu stykowego, problem doniosłej wagi jest znalezienie dogodnej metody pozwalającej na identyfikację oraz eliminację zawodności strukturalnych. Pierwszy sposób, który był dogodnym narzędziem do tego celu podał D.A. Huffman [2], wykorzystując metodę M. Karnaugha [7]. Okazuje się jednak, że metoda ta posiada pewną niedogodność wyrażającą się brakiem pełnego rozeznania, co do zachowania się układu w stanach nieaktywnych. Niedogodność tę zauważył autor i zaproponował [8] pewną modyfikację tej metody.

Wprowadza się rozszerzoną matrycę stanów, będącą rozwinięciem metody M. Karnaugha [7] na stany nieaktywne. Wyjaśnienie tej propozycji wymaga znowu pewnej uwagi o charakterze terminologicznym. M. Karnaugh w swej pracy posługuje się terminem angielskim "map", która na język polski jest różnie tłumaczony. Można tu wymienić przykładowo termin "siatka zależności" [9, s. 155], "tablica Karnaugha" [10, s. 40], "wykres Karnaugha [11, s. 107]. Zdaniem autora należy w tym przypadku skorzystać z ustalonej już terminologii stosowanej od dawna w logice, gdzie dla omawianego przypadku w sensie logicznym używa się terminu "matryca" [12, s. 69]. Z uwagi na to, że za pomocą wspomnianej matrycy opisuje się zachowanie układu przełączającego, który podczas pracy zmienia swoje stany, proponuje się termin <u>matryca stanów</u>.

Przy stosowaniu metody Kanraugha, do matrycy stanów wpisuje się wartości logiczne tylko dla stanów aktywnych. Z tak zbudowanej matrycy nie można wnioskować o zachowaniu się układu w stanach nieaktywnych. Proponuje się zatem rozszerzenie matrycy stanów, by dawała ona pełną informację o zachowaniu się układu, obejmującą tak stany aktywne, jak i nieaktywne.

Budowę rozszerzonej matrycy stanów przeanalizujemy na rys. 1. Realizujemy ją przez wprowadzenie do matrycy M. Karnaugha

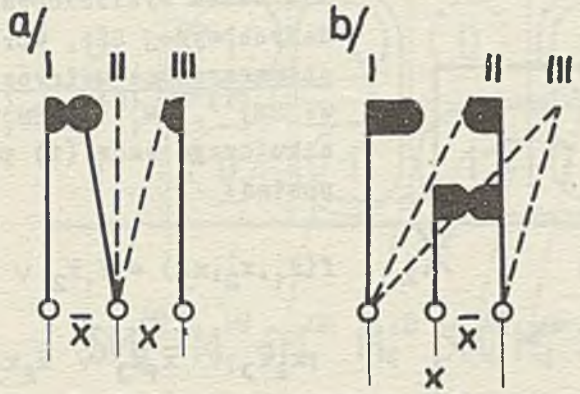
X_1 \ X_2X_3	00	X_3	01	X_2	11	X_3	10	X_2
0	000	{0,1}	001	{0,1}	011	{0,1}	010	{0,1}
X_1	{0,1}		{0,1}		{0,1}		{0,1}	
1	100	{0,1}	101	{0,1}	111	{0,1}	110	{0,1}

Rys. 1. Koncepcja rozszerzonej matrycy stanów

dodatkowych kolumn i wierszy, w których wpisujemy wartości logiczne tych zmiennych Boole'a, które zmieniają swe wartości podczas przejścia z jednego stanu aktywnego do drugiego sąsiedniego stanu aktywnego. Wartości te będą przyjmowane ze zbioru wartości logicznych [0,1]. Na rys. 1 interesujące nas wiersze i kolumny przyporządkowane są zmiennym x_1, x_2 i x_3 odpowiadającym zestykom przekaźników X_1, X_2 i X_3.

Należy stwierdzić,i wyraźnie podkreślić, że wartości funkcji pracy układu w stanach nieaktywnych zależą nie tylko od struktury układu (szeregowa, równoległa, mieszana itd.), lecz również i od rodzaju zastosowanych zestyków. Jak łatwo zauważyć na rys. 2, przy przejściu ze stanu pracy I do stanu III, czy też odwrotnie, zestyki muszą przyjąć stan przejściowy, tj. stan II, a więc muszą się znaleźć przez pewien okres czasu w stanie nieaktywnym. W schematach układów przekaźnikowych, które zawierają m.in. zestyki przełączne, nie podaje się jakiego rodzaju zestyki zostały zastosowane. Oczywiście wynika to z tej prostej przyczyny, że dla stanów aktywnych nie ma to żadnego znaczenia, gdyż w stanach tych zestyki tak przełączne, jak i przełączne bezprzerwowe zachowują się identycznie. Na-

tomiast w stanach nieaktywnych istnieje wyraźna różnica, między zachowaniem się tych zestyków. Podczas gdy pierwsze (rys. 2a) w stanie nieaktywnym powodują przerwę w obwodzie, to drugie (rys. 2b) takiej przerwy nie spowodują.



Rys. 2. Rodzaje zestyków przełącznych
a) zestyk przełączny, b) zestyk przełączny bezprzerwowy

Zachowania się układów w stanach nieaktywnych zależnie od rodzaju zastosowanych zestyków, nie można prześledzić metodą zaproponowaną przez D.A. Huffmana [2]. Podaje ona tylko warunek konieczny dla wystąpienia SZS. Warunek dostateczny dla jej wystąpienia można uzyskać w oparciu o rozszerzoną matrycę stanów.

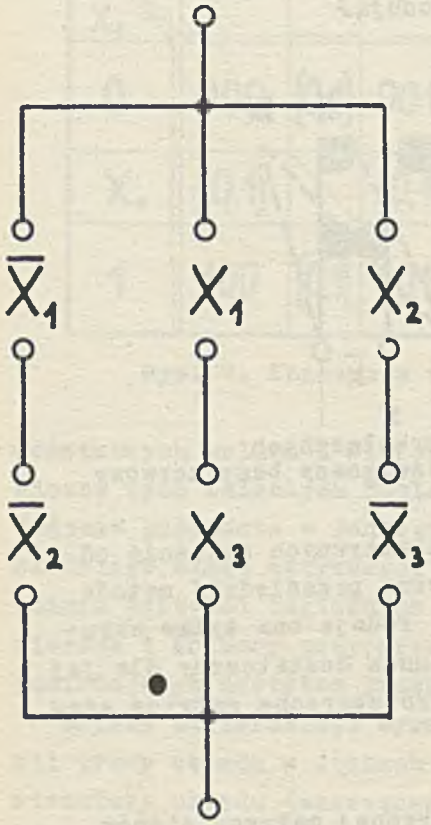
3. Eliminowanie SZS przy pomocy rozszerzonej matrycy stanów

Celem prześledzenia możliwości identyfikacji oraz eliminacji SZS przy pomocy rozszerzonej matrycy stanów, jak również porównania tej propozycji z metodą D.A. Huffmana [2], weźmiemy pod uwagę dwójnik przedstawiony na rys. 3, któremu odpowiada matryca M. Karnaugha przedstawiona na rys. 4. Jak widać z tego rysunku występują tutaj trzy podmatrycę jedynkowe $M_1^{(1)}$, $M_1^{(2)}$, $M_1^{(3)}$, z których wynika, że funkcja pracy dla rozpatrywanego dwójnika przyjmie postać:

$$f(x_1,x_2,x_3) = \bar{x}_1\bar{x}_2 \vee x_1x_3 \vee x_2\bar{x}_3 \qquad (1)$$

Stosując metodę D.A. Huffmana łatwo zauważyć, że SZS wystąpi podczas następujących przejść układu: 000 - 010, 001 - 101 oraz 111 - 110. Przejścia te oznaczono na rys. 4 strzałkami. Celem wyeliminowania podanych wyżej SZS, wprowadzamy stowarzyszone metryce jedynkowe $SM_1^{(1)}$, $SM_1^{(2)}$ i $SM_1^{(3)}$, w wyniku czego wzór (1) przyjmie postać:

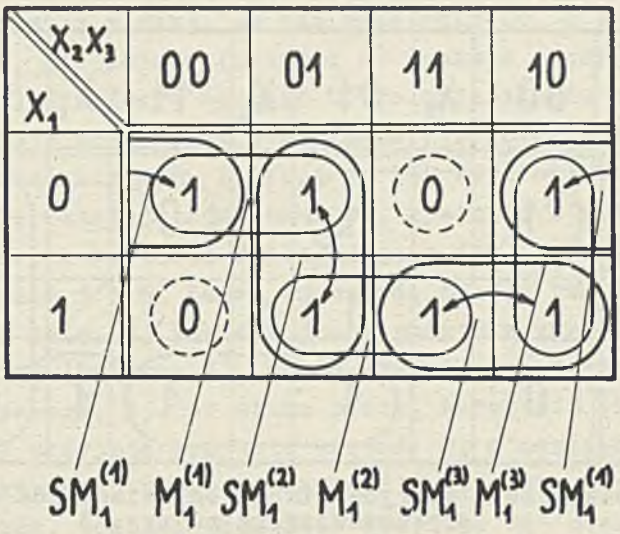
$$f(x_1,x_2,x_3) = \bar{x}_1\bar{x}_2 \vee x_1x_3 \vee x_2\bar{x}_3 \vee \bar{x}_1\bar{x}_3 \vee \bar{x}_2x_3 \vee x_1x_2 \qquad (2)$$



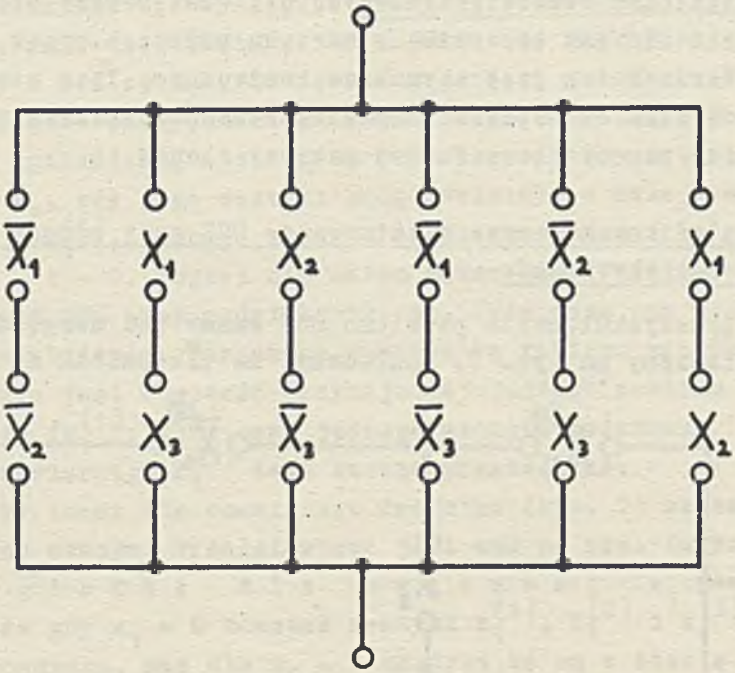
Rys. 3. Dwójnik posiadający SZS

Odpowiadający tej funkcji dwójnik przedstawiono na rys. 5. Widzimy, że ilość zestyków znacznie wzrosła, co z punktu widzenia minimalizacji układów jest niekorzystne.

Rozpatrzymy teraz ten sam przykład przy użyciu rozszerzonej matrycy stanów, która dla tego przypadku przedstawiona jest na rys. 6. Jak już wyżej wspomniano, przy przejściach układu oznaczonych na tym rysunku strzałkami może wystąpić SZS. Nie wystąpi ona jednak wówczas, gdy w stanach nieaktywnych wartości logiczne zmiennych x_1, x_2 i x_3 dla podanych przejść będą równe 1. Uzyskać to możemy stosując zestyki przełączne bezprzerwowe. Nie trzeba wobec tego wprowadzać nowych podmatryc, które w konsekwencji zawsze prowadzą do zwiększenia liczby zestyków układu.



Rys. 4. Matryca stanów dla dwójnika przedstawionego na rys. 3



Rys. 5. Dwójnik odpowiadający funkcji (2) i nie posiadający SZS

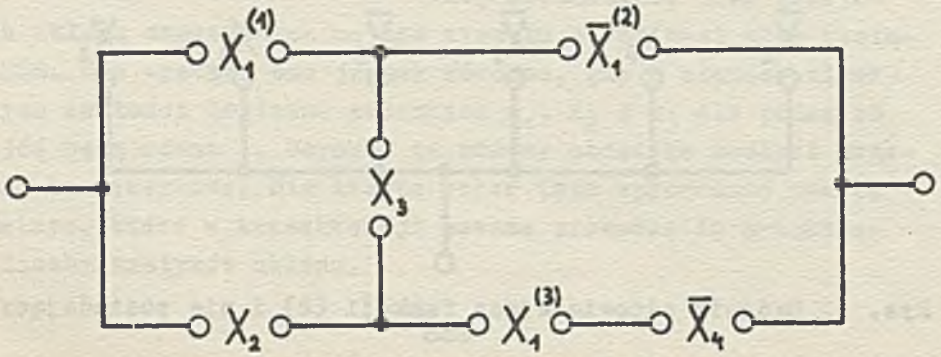
X_1 \ X_2X_3	00	X_3	01	X_2	11	X_3	10	X_2
0	1		1		0		1	1
X_1			1					
1	0		1		1	1	1	

Rys. 6. Rozszerzona matryca stanów odpowiadająca dwójnikowi przedstawionemu na rys. 3

Z przykładu tego widać, że niepokrycie wspólną podmatrycą dwu sąsiednich stanów jedynkowych nie musi zawsze prowadzić do powstania SZS jak to wynika z warunku podanego przez D.A. Huffmana. Warunek ten jest warunkiem koniecznym, lecz nie dostatecznym. Wynika on dopiero z analizy układu w stanach nieaktywnych przy pomocy rozszerzonej matrycy stanów.

4. Identyfikowanie oraz eliminowanie DSZ przy pomocy rozszerzonej matrycy stanów

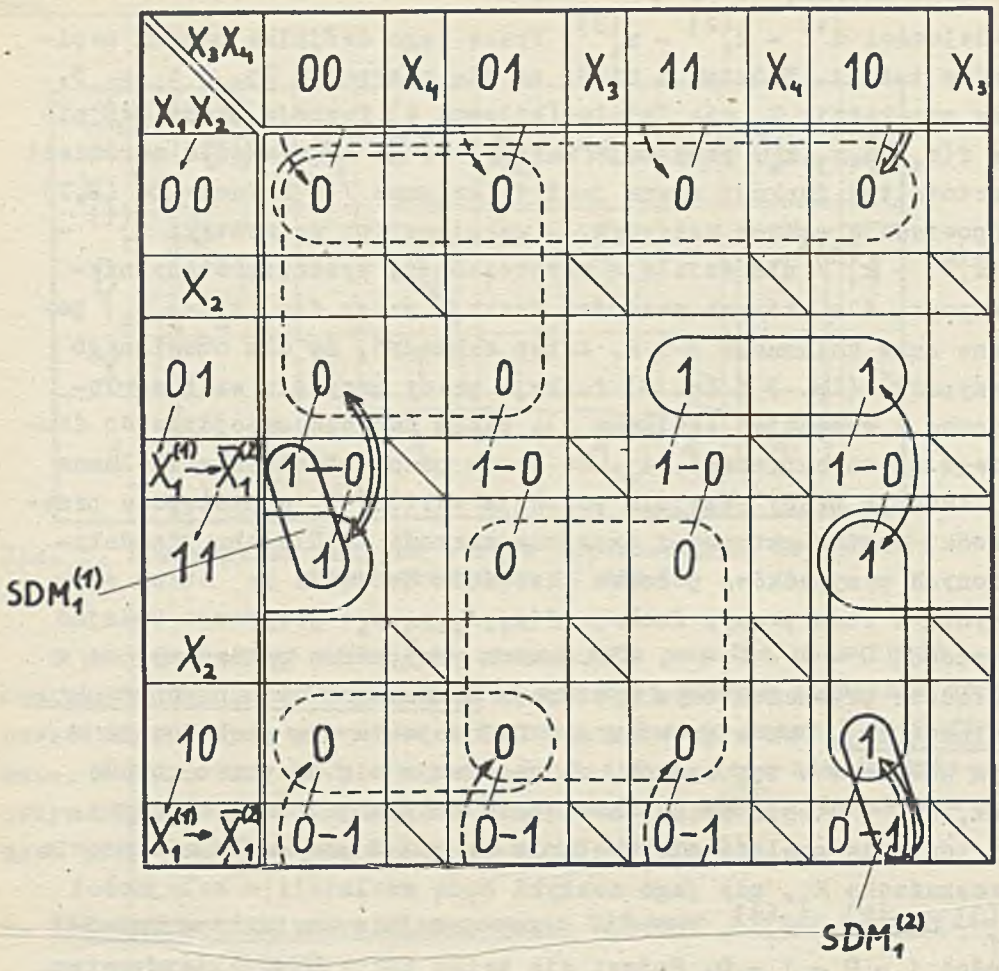
Celem przedyskutowania problemu DSZ weźmy pod uwagę dwójnik przedstawiony na rys. 7. Zakładamy, że przekaźnik X_1 posiada



Rys. 7. Dwójnik posiadający SZS i DZS

trzy zestyki $x_1^{(1)}$, $\bar{x}_1^{(2)}$ oraz $x_1^{(3)}$. Niech zestyki te pracują w kolejności $x_1^{(1)} - \bar{x}_1^{(2)} - x_1^{(3)}$. Pracę tego dwójnika możemy zapisać w tab. 1. Widzimy z niej, że dla przypadku Lp. 3 i Lp. 5, gdy przekaźnik X_1 nie działa (kolumna 4) funkcja pracy dwójnika $f(x_1,x_2,x_3,x_4)$ przyjmuje wartość 0. Po zadziałaniu natomiast wartość tej funkcji równa jest 1 (kolumna 7). Kolumny te (4,7) odpowiadają stanom aktywnym. Z uwagi na to, że zestyki $x_1^{(1)} - \bar{x}_1^{(2)} - x_1^{(3)}$ nie działają równocześnie, wystąpią stany nieaktywne, dla których wartości funkcji pracy $f(x_1,x_2,x_3,x_4)$ podane są w kolumnach 5 i 6. Łatwo zauważyć, że dla omawianego przypadku (Lp. 3 i Lp. 5) funkcja pracy przyjmie wartość logiczną 1 wcześniej (kolumna 5), zanim dwójnik przejdzie do drugiego stanu aktywnego, tj. do stanu pracy. Następnie (kolumna 6) funkcja pracy przyjmie ponownie wartość 0, a następnie przechodzi w stan aktywny i przyjmie wartość 1. Dla obu przedstawionych przypadków, podczas przejścia dwójnika ze stanu spoczynku w stan pracy, funkcja $f(x_1,x_2,x_3,x_4)$ przyjmuje kolejno wartości 0 - 1 - 0 - 1. Dla takich przypadków powiadamy, że w układzie przekaźnikowym występuje <u>dynamiczna zawodność strukturalna (DZS)</u>. Jak więc widzimy, DZS objawia się praktycznie w tym układzie w ten sposób, że zachowuje się on przez chwilę tak, jak w stanie pracy, następnie przyjmuje stan przeciwny, by ponownie znaleźć się w stanie pracy. W przypadku zwolnienia przekaźnika X_1, gdy jego zestyki będą zwalniały w kolejności $x_1^{(3)} - x_1^{(2)} - x_1^{(1)}$, funkcja pracy przyjmie wartości w kolejności 1 - 0 - 1 - 0. Pojawi się zatem także DZS. Widzimy więc, że gdy wystąpi DZS przy zadziałaniu, to także może ona wystąpić i przy zwalnianiu. Warunkiem koniecznym takiego zachowania się układu jest obecność przynajmniej jednego zestyku przełączonego ($x_1^{(1)}$, $\bar{x}_1^{(2)}$ oraz jednego zestyku zwiernego ($x_1^{(3)}$) lub rozwiernego $\bar{x}_1^{(3)}$ tego samego przekaźnika.

Sporządźmy teraz dla omawianego dwójnika (rys. 7) rozszerzoną matrycę stanów. Przedstawiona jest ona na rys. 8. Wartości l o g i c z n e d l a z m i e n n e j x_1 rozumiemy tak, że gdy $x_1 = 0$ wówczas zestyki $x_1^{(1)}$, $\bar{x}_1^{(2)}$ i $x_1^{(3)}$ są w stanie spoczynku, zaś dla $x_1 = 1$ zestyki te są w stanie pracy.



Rys. 8. Rozszerzona matryca stanów dla dwójnika przedstawionego na rys. 7

L.p.	Zmienne Boole'a			$f(X_1, X_2, X_3, X_4)$			
				$X_1^{(1)} \to \bar{X}_1^{(2)} \to X_1^{(3)}$			
	X_2	X_3	X_4	000	100	110	111
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	1	0	0	1	0	1
4	0	1	1	0	1	0	0
5	1	0	0	0	1	0	1
6	1	0	1	0	1	0	0
7	1	1	0	1	1	0	1
8	1	1	1	1	1	0	0

Tab. 1. Wartości logiczne przyjmowane przez zmienne oraz funkcję pracy dla dwójnika przedstawionego na rys. 7

Dla stanów nieaktywnych wpisujemy w wierszach tab. 2 takie wartości zmiennych $x_1^{(1)}$ i $\bar{x}_1^{(2)}$ jakie przyjmują one przy przejściu dwójnika ze stanu spoczynku w stan pracy, zachowując założoną kolejność działania zestyków. Oznaczona jest ona na tablicy 2 strzałkami. Strzałki te łączą ze sobą pary wartości logicznych. Tak np. przy przejściu ze stanu aktywnego $x_1x_2x_3x_4$ (0100) do drugiego stanu aktywnego $x_1x_2x_3x_4$ (1100) mamy do czynienia z następującymi parami: 0-1, 1-0, 0-1. Przy przejściu natomiast ze stanu aktywnego $x_1x_2x_3x_4$ (0101) do stanu aktywnego $x_1x_2x_3x_4$ (1101) wystąpią pary 0-1, 1-0 i 0-0. Wśród par tego typu zdarzyć się mogą pary 0-1, 1-0, 0-0 i 1-1. Pary typu 0-0 oraz 1-1 będziemy nazywali <u>parami równowartościowymi</u>, zaś pary typu 0-1 i 1-0 <u>parami różnowartościowymi</u>.

Jak łatwo zauważyć z tab. 2, tylko w dwu przypadkach tj. przy przejściach $x_1x_2x_3x_4$ (0100-1100) oraz $x_1x_2x_3x_4$ (0010-1010) mamy do czynienia wyłącznie z parami różnowartościowymi. Przejścia te oznaczono strzałkami podwójnymi. Odpowiadają one pozycjom Lp. 3 oraz Lp. 5, na tabl. 1, dla których stwierdziliśmy uprzednio pojawienie się DZS. Widzimy więc, że wytąpienie wyłącznie par różnowartościowych przy przejściu z jednego stanu aktywnego do drugiego stanu aktywnego jest dowodem na to, że układ posiada DZS. Pojawienie się choćby tylko jednej pary równowartościowej eliminuje powstanie DZS. Aby zapewnić sobie eliminację DZS należy tak zmodyfikować strukturę układu, bez zmiany jego właściwości funkcjonalnych, aby wystąpiła choćby jedna para równoimienna przy zmianie jednego stanu układu.

Postulat ten realizować możemy dwoma drogami postępowania. Jedna z nich [13] polega na wprowadzeniu dodatkowych obwodów zapewniających w stanach nieaktywnych wartość funkcji równą 1 zamiast wartości 0. Oznacza to przejście z pary 1-0 czy też 0-1 na parę 1-1. Aby to zrealizować należy wprowadzić dla naszego przypadku dwójnika następujące <u>stowarzyszone podmatrycę dynamiczne</u> $SDM_1^{(1)}$ i $SDM_1^{(2)}$, oznaczone na tab. 2 pogrubioną linią. Podmatrycom tym odpowiadają obwody $x_1^{(4)}x_2\bar{x}_3\bar{x}_4$ oraz $x_1^{(4)}\bar{x}_2x_3\bar{x}_4$. Obwody te należy włączyć równolegle do dwójnika przedstawionego na rys. 7. Oczywiście w tym przypadku rolę zestyku $x_1^{(4)}$ może z powodzeniem przyjąć istniejący już styk $x_1^{(1)}$.

Druga droga prowadząca do eliminacji DZS może być zrealizowana przez wprowadzenie odpowiednich zestyków przełącznych, podobnie jak to miało miejsce w omówionym już przypadku eliminacji SZS. Zależnie obowiem od tego czy zestyk $(x_1^{(1)}, \bar{x}_1^{(2)})$ będzie zestykiem przełącznym, czy też przełącznym bezprzerwowym możemy mieć do czynienia z parą 1-0 lub 0-1 i parą 0-0 lub 1-1.

Łatwo zauważyć z tab. 2, że w omawianych przypadku dwójnika wystąpi również SZS. Stany układu między którymi ona wystąpi, oznaczone są w stanach jedynkowych strzałką pojedynczą, zaś w stanach zerowych strzałkami przerywanymi. Może się zdarzyć, że wyeliminowanie DZS spowoduje automatyczne wyeliminowanie SZS. Tak jednak być nie musi. Występujące w naszym przykładzie SZS eliminujemy w sposób omówiony w rozdziale 3.

5. Zakończenie

Podane wyżej postępowanie eliminowania tak SZS jak i DZS przy pomocy proponowanej rozszerzonej matrycy stanów, jest dogodnym narzędziem w ręku projektującego układy przekaźnikowe. Badanie w opisany sposób zachowania się układu w stanach nieaktywnych, ze względu na wystąpienie tak SZS jak i DZS powinno stanowić dopełnienie syntezy układu, jeśli chcemy sobie zapewnić niezawodne jego działanie w sensie wyżej opisanym.

LITERATURA

[1] Pach. A - Analiza zawodności strukturalnej stykowych układów przełączających. Praca doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1964, s. 162, rys. 46, poz. bibl. 130.

[2] Huffman D.A. - The design and use of hazard-free swithing networks. Journal of the Association for Computing Machinery, vo. 4, 1957, no 1, p. 47-62.

[3] Pach A. - Elementy rzeczywiste i idealne w układach przekaźnikowych. Materiały III Krajowej Konferencji Automatyki. Gliwice, 1966, s. 91-100.

[4] Pach A. - Możliwości zastosowania logiki trójwartościowej oraz ciał skończonych Galois do opisu rzeczywistej pracy przekaźnika. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej nr 112, Automatyka, z. 1, 1966, s. 121-137.

[5] Naslin P. - Les aléas de continuite dans les circuits de comutation á séquences. Automatisme, Tome IV, Juin 1959, no 5, p. 220-225.

[6] Moisil gr. C. - Teoria algebriča a mecanismelcr automate. Bucuresti 1959, Editura Technica, p. 704.

[7] Kanraugh M. - The map method for synthesis of combinational logic circuits. Transaction of the Amercican Institution of Electrical Engineers, Communication and Electronics, vol. 72, part I, November 1953, p. 593-599.

[8] Pach A. - Pewna modyfikacja matrycy M. Karnaugha. Prace IV Krajowej Konferencji Automatyki. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 20-24 czerwca 1967, Sekcja Teorii Automatów, t. 2, s. 53-61.

[9] Siwiński J. - Układy przełączające w automatyce. Wyd. II, WNT, Warszawa 1968, s. 647.

[10] Traczyk W. - Projektowanie tranzystorowych układów przełączających. WNT, Warszawa 1966, s. 207.

[11] Głuszkow W. - Wstęp do cybernetyki. Tłum. z ros. KiW, Warszawa 1967, s. 455.

[12] Czeżowski T. - Logika. Wyd. II, PWN, Warszawa 1968, s. 281.

[13] Pach A. - Eine Methode der Elimination des dynamischen Hasards. In: Hazard and race phenomena in switching circuits. Circular Letter no 8. Publice par l'Institut de Mathematiques de l'Academie de la R.S. Roumanie et par le Centre de Calcula de l'Université de Bucarest, 1964, p. 303-316.