

## ZAGADNIENIE SPRZECZNOŚCI I WYKLUCZEŃ SPECJALNYCH W TECHNICIE SRK

Wiesław Zabłocki

dr hab. inż. Wiesław Zabłocki, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. 22 234 75 96, e-mail: zab@wt.pw.edu.pl

**Streszczenie.** W publikacji przedstawiono specyfikację dokumentacji wymaganej przy opracowywaniu założeń i projektowaniu komputerowych systemów sterowania ruchem. Istotnym zagadnieniem projektowania takich systemów jest automatyzacja utworzenia tablicy zależności z wykazem sprzecznych dróg przebiegów. Zalgorytmizowanie wyznaczania sprzeczności dróg przebiegów wymaga opracowania metody pozwalającej formalizować relacje sprzeczności. Podstawą formalizacji są szczegółowe właściwości obiektów drogi przebiegu i ich analiza zgodna z zasadami bezpieczeństwa, ze szczególnym uwzględnieniem funkcji sprzeczności dróg przebiegów. W projektowaniu komputerowych systemów sterowania powstaje dylemat: czy wyznaczenie funkcji sprzeczności spełnia także wymagania dotyczące sprzeczności dróg przebiegów o wykluczeniach specjalnych. Zaproponowana metoda formalizacji sprzeczności pozwala określić wystarczający warunek sprzeczności, który odnosi się także do wykluczeń specjalnych. Jednakże proponuje się zastosowanie klasycznej tablicy zależności z wykazanymi sprzecznościami dróg przebiegów i wykluczeniami specjalnymi. Oznaczenie wykluczeń specjalnych będzie stanowić dodatkowy czynnik bezpieczeństwa systemu srk.

**Słowa kluczowe:** ruch kolejowy, systemy sterowania, komputer zależnościowy, droga przebiegu, sprzeczność dróg przebiegu, wykluczenia specjalne dróg przebiegów, funkcje zależnościowe

### 1. Wprowadzenie

Komputerowe systemy sterowania ruchem kolejowym (srk), stanowiące integralne struktury sprzętu i oprogramowania, muszą spełniać wymagania bezpieczeństwa SIL4 (PN-EN 61508-1). Niezależnie od różnic systemów srk wynikających z ich koncepcji, metod specyfikacji, projektowania, struktury, sposobu funkcjonowania i realizacji funkcji bezpieczeństwa, systemy srk różnych producentów tworzą własne standardy i nie spełniają wzajemnych warunków kompatybilności. Projektowanie i realizacja systemu srk wymaga przygotowania szeregu dokumentów stanowiących formy opisu nieformalnego i formalnego. Pierwszy etap opracowania podstawowych dokumentów opisu nieformalnego obejmuje analizę założeń lub analizę wymagań systemu srk, zakończoną sformułowaniem założeń systemu srk. Dalsze etapy realizacji systemu mogą przebiegać według schematu zwanego cyklem V [4] i w odniesieniu do analizy RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety). Do niezbędnych dokumentów tworzących założenia systemu srk należą:

- opis pracy stacji (technologia pracy stacji),

- plan schematyczny urządzeń srk,
- specyfikacja dróg przebiegów w obszarze stacji z wykazaniem obiektów drogi jazdy i obiektów ochronnych,
- tablica zależności lub inne równoważne dokumenty.

Powyższe dokumenty stanowią obligatoryjne minimum projektowe systemu srk. Pozostałe, także istotne dokumenty obejmują instrukcje, np. [1,11] i inne szczególne dokumenty, zależnie od specyficznych wymagań i celów, dla których tworzony jest system srk.

Ogólne i szczególne wymagania bezpieczeństwa komputerowych systemów srk zostały sformułowane m.in. w [8,11]. Wymagania te m.in. *powinny być realizowane poprzez wykonanie uzależnień w urządzeniach stacyjnych odpowiednio do zastosowanych urządzeń* [11], przy czym pod pojęciem uzależnienia rozumie się *wzajemne powiązanie między urządzeniami sterowania ruchem, np. między semaforem, a zwrotnicą, mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa ruchu* [11]. Oznacza to, że podanie sygnału zezwalającego na jazdę jest uzależnione od nastawienia zwrotnic i innych urządzeń wchodzących w drogę przebiegu oraz wykluczenia sprzecznych dróg przebiegów. Sprzeczność lub niesprzeczność są zasadniczymi właściwościami drogi przebiegu w odniesieniu do innej drogi przebiegu. Interpretacja sprzeczności lub niesprzeczności dróg przebiegów ma charakter czasoprzestrzenny i jest analizowana w trakcie sterowania zachodzącego w pewnym czasie. Przebiegi odpowiadające sprzecznym drogom przebiegów muszą odbywać się w rozłącznych przedziałach czasu, natomiast przebiegi odnoszące się do niesprzecznych dróg przebiegów mogą odbywać się jednocześnie. Na podstawie analizy założeń ruchowych pracy stacji i analizy uzależnień każdej drogi przebiegu redaguje się tablicę zależności.

## 2. Tablica zależności

**Tablica zależności**, niezależnie od techniki realizacji urządzeń lub systemów srk, jest dokumentem o szczególnym znaczeniu, ponieważ opis tzw. zależności zawarty w tablicy zależności i wynikających z tablicy uzależnień jest opisem jednoznacznym. Opisy zależności mogą się różnić ze względu na typ urządzeń srk lub systemów srk, dla jakich zostały opracowane. W przypadku systemów przekaznikowych lub komputerowych, zapis zależności może zostać zredagowany także w formie kart przebiegów lub tablic przebiegów. Obligatoryjnym dokumentem, niezależnym od wymienionych zapisów, jest **wykaz przebiegów sprzecznych** [11]. Przykładowa tablica zależności (rys. 1) spełniająca wymagania zapisu zależności będzie zawierać:

- wykaz, z oznaczeniami (nazwy lub symbole) i krótkimi opisami, poszczególnych dróg przebiegów zaprojektowanych dla stacji z wykazaniem właściwości obiektów dróg przebiegów,
- symboliczne oznaczenie wzajemnych relacji w odniesieniu do każdej pary dróg przebiegów typu: sprzeczność, sprzeczność szczególna, czyli wykluczenie specjalne lub brak sprzeczności,



$$\sigma_{r_{p,k,i,j}} : \sigma_{r_{p,k,i,j}}(p, k, j, i) \longrightarrow \{0, 1\} \quad (1)$$

Gdy  $\sigma_{r_{p,k,i,j}} = 1$  oznacza to, że  $k$  – ty obiekt  $i$  –go typu posiada własność  $j$  w  $p$  – tej drodze przebiegu, a gdy  $\sigma_{r_{p,k,i,j}} = 0$  oznacza to, że  $k$  – ty obiekt  $i$  –go typu nie posiada własności  $j$  w  $p$  – tej drodze przebiegu. Relację uczestniczenia obiektu o numerze  $k$  i identyfikatorze  $id_k$  w drodze przebiegu  $DP_p$  można zapisać następująco:

$$\begin{aligned} id_k \in DP_p &\Leftrightarrow \sum_{j=1}^a \sigma_{r_{p,k,i,j}} \geq 1, \text{ element } id_k \text{ należy do drogi przebiegu } DP_p \\ id_k \notin DP_p &\Leftrightarrow \sum_{j=1}^a \sigma_{r_{p,k,i,j}} = 0, \text{ element } id_k \text{ nie należy do drogi przebiegu } DP_p \end{aligned} \quad (2)$$

Relacja (2) pozwala wprowadzić funkcję sprzeczności statycznej  $\sigma_{sp}(DP_p, DP_s)$  między dwoma różnymi drogami przebiegów, odpowiednio:

$$\sigma_{sp}(DP_p, DP_s) = \begin{cases} 1 & \text{dla } DP_p \cap DP_s \neq \emptyset, \text{ sprzeczne drogi przebiegów, zawierają wspólne} \\ & \text{obiekty dróg jazdy i dróg ochronnych,} \\ 0 & \text{dla } DP_p \cap DP_s = \emptyset, \text{ niesprzeczne drogi przebiegów, nie zawierają} \\ & \text{wspólnych obiektów dróg jazdy i dróg ochronnych} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:  $DP_p$  i  $DP_s$  zbiory obiektów dróg przebiegów odpowiednio  $p$  – tej i  $s$  – tej drogi przebiegu.

Pierwsza relacja wyrażenia (3) określa warunek wystarczający sprzeczności dróg przebiegów, ponieważ drogi przebiegów  $DP_p$  i  $DP_s$  zawierają wspólne obiekty, które mają własności uczestnictwa w drogach jazdy lub w drogach ochronnych tych dróg przebiegów.

Druga relacja wyrażenia (3) określa warunek wystarczający niesprzeczności dróg przebiegów, ponieważ drogi przebiegów  $DP_p$  i  $DP_s$ , nie zawierają wspólnych obiektów, które nie mają własności uczestnictwa w drogach jazdy i w drogach ochronnych tych dróg przebiegów.

Warunek wystarczający sprzeczności jest bardziej interesujący niż warunek wystarczający niesprzeczności. Istotnym staje się więc sprecyzowanie warunków sprzeczności. W tym celu przeprowadza się szczegółową analizę składników dróg przebiegów  $DP_p$  i  $DP_s$  oraz własności poszczególnych obiektów w tych drogach przebiegów. W przypadku dowolnego układu torowego analiza może odnosić się do:

- wszystkich obiektów i własności tych obiektów należących do każdej drogi przebiegu lub
- tylko tych wspólnych obiektów, których własności spełniają wystarczający warunek sprzeczności.

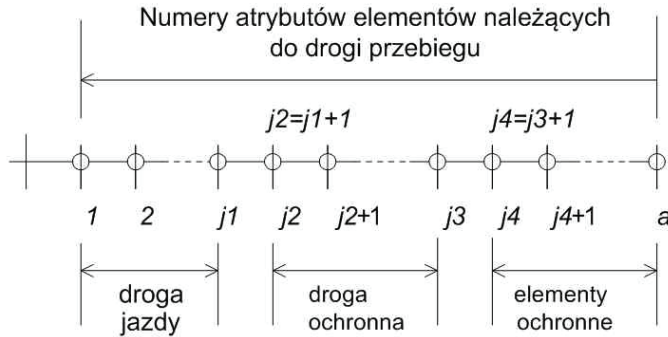
Formułowanie relacji pozwalających wyznaczyć wartości statycznej funkcji sprzeczności dla różnych przypadków występowania wspólnych obiektów w drogach przebiegów musi odpowiadać zasadom sterowania i przepisom ruchu kolejowego, np. [1,10], które zależnie od zarządu kolei są zazwyczaj zróżnicowane.

Do celów sformułowania relacji wyróżnia się poszczególne grupy własności o wskaźnikach należących do:

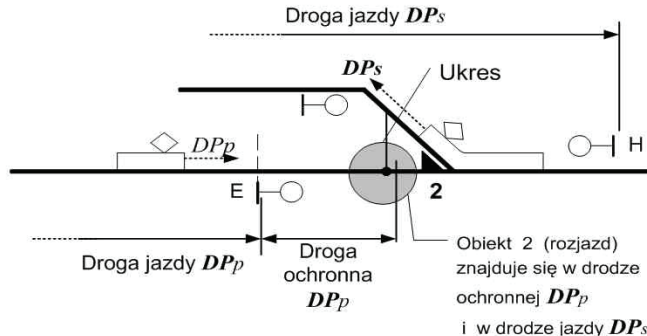
- drogi jazdy:  $1 \leq j \leq j1$ ,
- drogi ochronnej:  $j2 \leq j \leq j3$ ,
- obiektów ochronnych:  $j4 \leq j \leq a$

i analizuje własności tych obiektów. Grupy własności i ich wskaźniki  $j$  przedstawia rys. 2.

Pozwala to określić wartości funkcji sprzeczności [14]. Przykład relacji pozwalającej określić wartości funkcji sprzeczności statycznej w przypadku, gdy  $k$  – ty obiekt o identyfikatorze  $id_k$  znajduje się w drodze ochronnej drogi przebiegu  $DP_p$  i jest jednocześnie obiektem drogi jazdy drogi przebiegu  $DP_s$  przedstawia rys. 3. Na rysunku tym pokazano rozjazd 2, który należy do drogi ochronnej drogi przebiegu  $DP_p$  i jednocześnie należy do drogi jazdy  $DP_s$ . Koniec drogi ochronnej  $DP_p$  „zachodzi” w ukres rozjazdu 2 tworząc niebezpieczną strefę. Relację odpowiadającą temu przypadkowi reprezentuje wyrażenie (4).



Rys. 2. Oznaczenia wskaźników własności obiektów drogi przebiegu

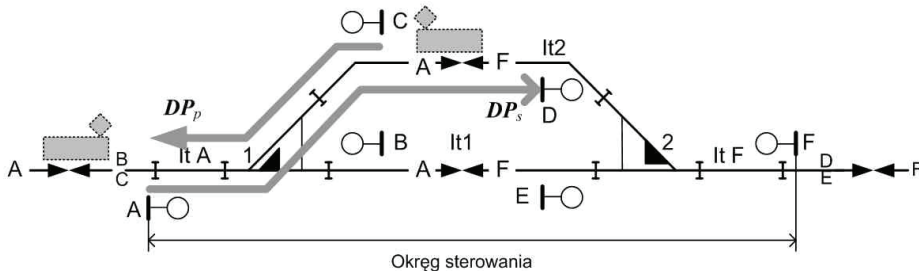


Rys. 3. Obiekt 2 znajduje się w drodze ochronnej  $DP_p$  i w drodze jazdy  $DP_s$ . Funkcja sprzeczności statycznej  $\sigma_s(DP_p, DP_s) = 1$

$$\bigwedge_{DP_p} \bigwedge_{\substack{DP_s \\ s \neq p}} \bigvee_{\substack{id_k \in DP_p \\ id_k \in DP_s}} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{j1} \sigma_{r_{p,2,i,j}} = 0 \wedge \sum_{j=2}^{j3} \sigma_{r_{p,2,i,j}} \geq 1 \\ \sum_{j=1}^{j1} \sigma_{r_{p,2,i,j}} \geq 1 \end{array} \right. \Rightarrow \sigma_{sp}(DP_p, DP_s) = 1 \quad (4)$$

Wyrażenie (4) interpretuje się następująco: jeśli dla drogi przebiegu  $DP_p$  i drogi przebiegu  $DP_s$  istnieje obiekt o identyfikatorze  $id_k$  i numerze  $k$ , a właściwość tego obiektu wskazują, że obiekt ten uczestniczy jako obiekt drogi ochronnej  $DP_p$  – funkcja uczestnictwa  $\sigma_{r_{p,2,i,j}} = 1$  w zakresie właściwości  $j2 - j3$  (górną relacją (4)) oraz uczestniczy w drodze przebiegu  $DP_s$  jako obiekt drogi jazdy – funkcja uczestnictwa  $\sigma_{r_{p,2,i,j}} = 1$  w zakresie właściwości  $1 - j1$  (dolną relacją (4)). Nierówności w zapisach relacji oznaczają, że obiekt o identyfikatorze  $id_k$  i numerze  $k$ , może mieć w drogach przebiegu  $DP_p$  i  $DP_s$  więcej właściwości uczestnictwa, czyli więcej niż jedną funkcję uczestnictwa  $\sigma$ . Relacja ta (4) spełnia warunek wystarczający sprzeczności.

Szczególnym przypadkiem sprzeczności są tzw. wykluczenia specjalne, które odnoszą się do sprzecznych dróg przebiegu zawierających obiekty, przy czym obiekty te mogą się różnić właściwościami uczestnictwa w tych drogach, ale obiekty nastawcze przyjmują takie same położenia, natomiast zróżnicowanie może dotyczyć obiektów początkowych i końcowych tych dróg (zwrot dróg przebiegów sprzecznych). Niekiedy, ze względu na technikę wykonania systemu srk lub specyficzne przypadki, projektanci uzupełniają określenie wykluczeń specjalnych o istotne stwierdzenie, że sprzeczne drogi przebiegów zaliczane do wykluczeń specjalnych ze względu na sposób uzależnień nie mogą się wzajemnie wykluczać. Przykład sprzeczności typu wykluczenie specjalne dwóch dróg przebiegów został przedstawiony na rys. 4, a wyrażenie opisu sformalizowanego przedstawia (5). Dwie sprzeczne drogi przebiegu  $DP_p$  i  $DP_s$ , odpowiednio spod semafora C, przebieg wyjazdowy i spod semafora A, przebieg wjazdowy, spełniają kryterium sprzeczności wykluczenia specjalnego.



Rys. 4. Przykład sprzecznych dróg przebiegów o wykluczeniu specjalnym

$$\bigwedge_{DP_p} \bigwedge_{\substack{DP_s \\ s \neq p}} \bigvee_{\substack{id_k \in DP_p \\ id_k \in DP_s}} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{j1} \sigma_{r_{p,1,i,j}} \geq 1 \wedge \sum_{j=j4}^a \sigma_{r_{p,2,i,j}} \geq 1 \\ \sum_{j=1}^{j3} \sigma_{r_{s,1,i,j}} \geq 1 \wedge \sum_{j=j4}^a \sigma_{r_{p,2,i,j}} \geq 1 \end{array} \right. \Rightarrow \sigma_{sp}(DP_p, DP_s) = 1 \quad (5)$$

Powyższa relacja (5) spełnia wystarczający warunek sprzeczności, ponieważ funkcje uczestnictwa  $\sigma_r$  i  $\sigma_r$  obiektów 1 i 2 w drogach przebiegów  $DP_p$  i  $DP_s$  obejmują własności bycia obiektami w drogach jazdy, obiekt 1, w kierunku zwrotnym i obiekt 2, jako ochronny w położeniu na wprost. Relacja (5) z uwagi na pozostałe obiekty dróg przebiegu  $DP_p$  i  $DP_s$  może być uzupełniana o kolejne składniki koniunkcji.

Przedstawiony powyżej sposób analizy sprzeczności dróg przebiegów oparty na analizie relacji sprzeczności pozwala zalgorytmizować i zautomatyzować proces wyznaczania funkcji sprzeczności  $\sigma_{sp}$  każdej pary dróg przebiegów  $DP_p$  i  $DP_s$  zadanego układu torowego. Wyznaczone wartości statycznej funkcji sprzeczności mogą zostać zredagowane w formie wykazu przebiegów sprzecznych, jako istotny fragment tablicy zależności, a także mogą zostać zapisane w pamięci komputera, np. jako macierz sprzeczności. Wykaz przebiegów sprzecznych zredagowany w procesie projektowania jako macierz sprzeczności utworzony jest jednorazowo dla zadanej stacji, jest niezmienny i służy tylko do odczytu informacji w trakcie sterowania ruchem. Informacje o sprzeczności są podstawą wybierania drogi przebiegu i stają się elementami równań zależnościowych, in. jako predyspozycje przebiegowe.

#### 4. Zakończenie

Przedstawiona w publikacji metoda formalizacji relacji opisujących funkcje sprzeczności pozwala zalgorytmizować i skomputeryzować proces projektowania tablicy zależności lub wykazów zależności. Metoda budowy relacji sprzeczności dróg przebiegów odwołuje się do analizy właściwości obiektów uczestniczących w tych drogach przebiegów, tj. uwzględnia szczegółowo właściwości obiektów drogi jazdy, drogi ochronnej i obiektów ochronnych. Relacje sprzeczności mogą być tworzone jako warunki wystarczające sprzeczności lub jako warunki wystarczające niesprzeczności. Metoda pozwala również określić sprzeczność dróg przebiegów określoną jako wykluczenie specjalne. Jednakże nie wymaga to stosowania specjalnych rozwiązań programistycznych odwołujących się do wykluczeń specjalnych, wystarczającym i koniecznym kryterium staje się wartość funkcji sprzeczności. Nie przesądza to rezygnacji z dotychczasowej tablicy zależności wykazującej sprzeczności dróg przebiegów i wykluczenia specjalne. Jak dotąd klasyczna tablica zależności jest niezastąpiona, a wykluczenia specjalne pozostają istotnym czynnikiem analizy bezpieczeństwa w sterowaniu ruchem. Zagadnienie tablicy zależności

i wykluczeń specjalnych podjęto także w [2], przy czym zagadnienie to nie zostało w pełni rozwiązane. Opracowana metoda staje się formą standaryzacji systemu srk oraz stwarza podstawy do poszukiwania nowych efektywnych metod specyfikacji i programowania komputerów zależnościowych.

## Bibliografia

1. Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1 (R-1), tekst ujednolicony przyjęty uchwałą Nr 176/2008 oraz zarządzeniami Nr 3/2011 i Nr 13/2014 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
2. Koliński D., Metoda specyfikacji i weryfikacji funkcji zależnościowych w systemach sterowania ruchem kolejowym, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa 2013.
3. König N. H., The Euro-Interlocking Project Standards for Interlocking Systems in Europe Project, Presentation for Polish Railways, 8 June 2004.
4. Maciejewski M., Zabłocki W., Basis of the Formalization and the Algorithmization of the Control Functions in ATC Systems, Communications in Computer and Information Science, Transport Systems Telematics, Nr 104, Springer Verlag, Berlin - Haidelberg 2010, 253 – 262.
5. Maciejewski M., Zabłocki W., Metoda tworzenia funkcji i równań zależnościowych w systemach srk, Logistyka, nr 4/2010.
6. Maciejewski M., Zabłocki W., Wybrane problemy tworzenia funkcji i równań zależnościowych w systemach srk, Prace Naukowe, Politechnika Warszawska, seria Transport, z. 72, Warszawa 2010, s. 87 – 100.
7. Słownik pojęć i skrótów, KSR/03/09, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa, 2009.
8. van Vlijmen S.F.M., Verification of the Vital Processor Interlocking, FME-Rail Workshop 1, 8 – 9 June 1996, Netherland.
9. Wymagania bezpieczeństwa dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym – DG PKP KA nr KA2b-5400-01/98 z dnia 06.02.1998r.
10. Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym Ie-4 (WTB-E10), Załącznik do zarządzenia Nr 1/2014 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 14 stycznia 2014.
11. Zabłocki W., A Formal Analysis of Conflict Functions Used in Rail Traffic Control Systems, The Archives of Transport, vol. 18, Warszawa 2006.
12. Zabłocki W., Podstawy opisu formalnego zależności stacyjnych, Prace naukowe TRANSPORT, Politechnika Warszawska, z. 62/2007.
13. Zabłocki W., Interlocking Functions of ATC Station System, The Archives of Transport, vol. 20, Warszawa 2008.
14. Zabłocki W., Modelowanie stacyjnych systemów sterowania ruchem kolejowym, Prace Naukowe TRANSPORT, zeszyt 65, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.