POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Paweł Drózd

Metoda generowania testów funkcjonalnych urządzeń sterowania ruchem kolejowym

Promotor:

dr hab. inż. Adam Rosiński, prof. uczelni

Promotor pomocniczy:

dr inż. Lech Konopiński

WARSZAWA 2022

Składam serdeczne podziękowania
wszystkim, dzięki którym praca powstała a szczególnie:

dr hab. inż. Adamowi Rosińskiemu, prof. uczelni
za merytoryczne i cenne rady, poświęcony czas,
ogrom życzliwości i wyrozumiałości,
wszelką pomoc i wsparcie

dr inż. Lechowi Konopińskiemu
za współpracę, przekazaną wiedzę i doświadczenie
oraz cenne uwagi i wsparcie merytoryczne

Śp. dr hab. inż. Wiesławowi Zabłockiemu, prof. uczelni
pod którego opieką stawiałem pierwsze kroki
co wpłynęło na ogólny kształt oraz zakres pracy.

Streszczenie

„Metoda generowania testów funkcjonalnych urządzeń sterowania ruchem kolejowym”

Praca dotyczy opracowania metody generowania testów funkcjonalnych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Testy są wykorzystywanie w całym syklu życia urządzeń, a ich największe zastosowanie jest w momencie ich certyfikacji gdy wdrażamy urządzenia i potwierdzamy spełnienie wymagań oraz eksploatacji w trakcie okresowej diagnostyki czy po naprawach urządzeń. W początkowych rozdziałach dokonano przeglądu literaturowego i zdefiniowano obszar badawczy, cel oraz tezę pracy. Dokonano charakterystyki stosowanych urządzeń sterowania ruchem kolejowym, stawiane im podstawowe wymagania oraz przedstawiono ich definicję. Szczególną uwagę zwrócono na właściwości urządzeń zarówno funkcjonalne jak i diagnostyczne. Kolejny rozdział skupia się na zagadnieniach badań diagnostycznych obiektów technicznych, ich modelowaniu oraz organizacji procesów diagnostycznych. Przedstawiono podstawowe i stosowane metody diagnozowania stanu urządzeń oraz dokonano analiz przydatności w badaniu stanu urządzeń srk. Następnie dokonano analiz badań diagnostycznych, kontroli i monitorowania realizacji funkcji urządzeń srk w różnych procesach występujących w cyklu życia urządzeń.

Opracowano założenia, na których oparto i zbudowano model funkcjonalno – diagnostyczny komputerowych stacyjnych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Wybrano urządzenia stacyjne ze względu na najbardziej rozbudowaną strukturę i funkcjonalność w stosunku do urządzeń liniowych czy sygnalizacji przejazdowej. Wyróżniono elementy konfiguracji urządzeń oraz wyspecyfikowano cechy jak stan i status poszczególnych elementów konfiguracji urządzeń jakie występują podczas realizacji procesów ruchowych na stacji.

Wyniki przeprowadzonych badań i analiz były podstawą do opracowania założeń metody oraz samej metody wyznaczania testów funkcjonalnych. Opracowano algorytm postepowania wyznaczania testów, określono warunki jakie musi spełniać zbiór testów oraz kryteria optymalizacyjne. W końcowej części pracy przeprowadzono weryfikację metody, podano przykłady obliczeniowe oraz wydruki z implementacji danych w środowisku Mathematica, przeprowadzono analizę wyników. Pracę kończy rozdział z podsumowaniem i wnioskami z przeprowadzonych rozważań.

Słowa kluczowe: urządzenia srk, testy funkcjonalne, diagnostyka, model

Summary

The method of generating functional tests of railway traffic control devices.

The thesis concerns the development of a method for generating functional tests of railway traffic control devices. Tests are used throughout the life cycle of devices. Their greatest use is at the time of their certification, when we implement devices and confirm compliance with the requirements and during periodic diagnostics or after device repairs. In the initial chapters a literature review was carried out and the research area, goal and thesis of the work were defined. The characteristics of the used railway traffic control devices were made, as well as the basic requirements for them and their definition was presented. Particular attention was paid to the functional and diagnostic properties of the devices. The next chapter focuses on the issues of diagnostic tests of technical objects, their modeling and the organization of diagnostic processes. The basic and applied methods of diagnosing the condition of devices were presented and analyzes of the usefulness in examining the condition of the railway traffic control devices were made. Then, analyzes of diagnostic tests, control and monitoring of the performance of the railway traffic control equipment functions in various processes occurring in the equipment life cycle were performed.

Assumptions were developed on which the functional and diagnostic model of computer station railway traffic control devices was based and built. Station devices were selected due to the most extensive structure and functionality in relation to line block devices or level crossing signaling systems. Device configuration elements were distinguished and features such as the state and status of individual device configuration elements that occur during the implementation of operational processes at the station were specified.

The results of the research and analyzes were the basis for the development of the assumptions of the method and the method of determining functional tests. The test determination procedure algorithm was developed, the conditions to be met by the set of tests and optimization criteria were defined. In the final part of the work, the method was verified, computational examples and printouts of data implementation in Mathematica environment were given, and the results were analyzed. The work ends with a chapter with a summary and conclusions from the deliberations.

Key words: railway traffic control devices, functional tests, diagnostics, model

Spis treści

1. Wstęp ... 10
1.1 Wprowadzenie do zagadnienia ... 10
1.2 Sformułowanie problemu ... 11
1.3 Cel i teza pracy ... 22
2 Systemy sterowania ruchem kolejowym ... 23
2.1 Charakterystyka urządzeń sterowania ruchem kolejowym ... 23
2.2 Niezawodność i dostępność ... 28
2.3 Definicja systemu srk ... 32
2.4 Struktura stacyjnych urządzeń srk ... 33
2.5 Własności funkcjonalne i diagnostyczne urządzeń srk ... 37
3 Badania diagnostyczne w cyklu życia systemu srk ... 42
3.1 Badania diagnostyczne obiektów technicznych ... 42
3.2 Badania diagnostyczne systemów sterowania ruchem kolejowym ... 54
3.3 Monitorowanie funkcjonowania urządzeń ... 64
3.4 Kontrola funkcjonowania urządzeń ... 68
4 Model funkcjonalno – diagnostyczny stacyjnych urządzeń srk ... 71
4.1 Założenia modelu urządzeń stacyjnych ... 71
4.2 Model stacyjnego systemu srk ... 72
5 Metoda wyznaczania testów funkcjonalnych urządzeń srk ... 80
5.1 Wstępne informacje ... 80
5.2 Algorytm stosowania metody ... 86
5.3 Wyznaczanie zbioru testów ... 90
5.4 Przykład zastosowania metody wyznaczana testów ... 97
6 Weryfikacja metody wyznaczania testów funkcjonalnych urządzeń srk ... 103
6.1 Profilowanie zadania ... 103
6.2 Wyznaczenie zbioru sprawdzeń dla kontroli poprawności algorytmów zwrotnicowych ... 111
6.3 Wyznaczenie zbioru sprawdzeń dla kontroli poprawności algorytmów semaforów ... 114
6.4 Wyznaczenie zbioru sprawdzeń dla kontroli poprawności algorytmów odcinków torowych i zwrotnicowych ... 117
7 Podsumowanie i osiągnięcia ... 121
8 Bibliografia ... 125

Słownik podstawowych pojęć

Funkcja	- sposób działania, przez który system spełnia swoje przeznaczenie
Stan funkcjonalny systemu	- stan w którym system jest w stanie zrealizować zadaną funkcję lub nie (spełnia wymagania lub nie). Rozróżnić można stan zdatności oraz stan niezdatności funkcjonalnej
System srk	- szczególny rodzaj systemu stosowany w kolejnictwie do sterowania ruchem pociągów w skład którego wchodzą urządzenia srk
Sterowanie ruchem	- przekazywanie poleceń dotyczących ruchu kolejowego urządzeniom i osobom uczestniczącym w ruchu kolejowym, na podstawie znajomości aktualnej sytuacji ruchowej i znajomości stanu urządzeń
Urządzenia srk	- fizyczne urządzenia infrastruktury kolejowej należące do urządzeń zabezpieczenia ruchu kolejowego służące do sterowania ruchem kolejowym oraz zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa i sprawności ruchu kolejowego
Uszkodzenie	- przejście elementu systemu lub systemu ze stanu zdatności do stanu niezdatności
Test	- okresowo wykonywane sprawdzenie w celu kontroli poprawności działania na zgodność z założeniami i wymaganiami oraz wykrycia ewentualnych uszkodzeń
Konfiguracja	- struktura oraz powiązania sprzętu i oprogramowania systemu do ich zakładanego zastosowania do realizacji określonego zadania

Użytkowanie	- działanie związane z wykorzystaniem urządzeń zgodne z konstrukcją, przeznaczeniem i założeniami dokumentacji technicznej
Obsługiwanie	- działanie organizacyjno-techniczne związane z utrzymywaniem w ciągłej sprawności technicznej urządzeń oraz podtrzymywaniem i przywracaniem im zdatności użytkowej
Uszkodzenie	- przejście elementu, a niekiedy i całego obiektu ze stanu zdatności w stan niezdatności
Diagnostyka techniczna	- ocena stanu technicznego urządzeń poprzez badanie własności procesów roboczych i towarzyszących pracy obiektu oraz badanie własności wytworów obiektu
Zdatność funkcjonalna	- stan, w którym obiekt jest zdolny do realizacji zakładanych funkcji pod warunkiem, że jest zdatny technicznie i odpowiednio wysterowany (pobudzony)

1. Wstęp

1.1 Wprowadzenie do zagadnienia

Urządzenia sterowania ruchem kolejowym jako urządzenia techniczne zabezpieczające ruch pojazdów szynowych muszą spełniać wymagania dotyczące określonego poziomu bezpieczeństwa i sprawności ruchu. Są projektowane pod kątem pewności działania w warunkach docelowego zastosowania przez założony czas ich eksploatacji. Niezależnie od typu i rodzaju, urządzenia muszą zachowywać się zgodnie z założonymi zasadami funkcjonowania i stawianymi im wymaganiami zawartymi w dokumentach normatywnych, wymaganiach bezpieczeństwa, wytycznych technicznych czy instrukcjach sygnalizacji i prowadzenia ruchu. Każdy system sterowania ruchem kolejowym musi zachowywać się zgodnie z tymi zasadami, zarówno w przypadku właściwego funkcjonowania, jak i w przypadku uszkodzeń czy niezgodnej z założeniami eksploatacji. Wszelkie odchylenia od prawidłowej pracy, utrata realizowanych funkcji, mogą spowodować zakłócenia w ruchu lub bezpośrednio doprowadzić do zagrożenia bezpieczeństwa i życia ludzi oraz strat materialnych w postaci uszkodzenia taboru i infrastruktury.

Badanie poprawności działania czyli poprawnej realizacji funkcji jest niezbędnym elementem ich eksploatacji. Kontrola ta jest już realizowana w trakcie projektowania urządzeń, procesie dopuszczania urządzeń do eksploatacji i procesie diagnostyki eksploatacyjnej urządzeń. W cyklu życia system srk poddawany jest modyfikacji lub modernizacji. Często przy wdrażaniu nowych urządzeń należy wykonać powiązania z istniejącym urządzeniami. Po takich zabiegach konieczne jest sprawdzenie systemu celem stwierdzenia zgodności działania z założeniami i wymaganiami, czyli czy system po modernizacji utrzymał zakładaną funkcjonalność a powiązane systemy wykazują bezpieczną i poprawną współpracę. Badania funkcjonalne przeprowadza się również po wypadkach kolejowych jeżeli okoliczności wypadku wskazują, że potencjalną przyczyną są urządzenia sterowania ruchem. Poprawność realizacji wymaganych funkcji ocenia się na podstawie wyników przeprowadzonych testów funkcjonalnych oraz analiz otrzymanych wyników.

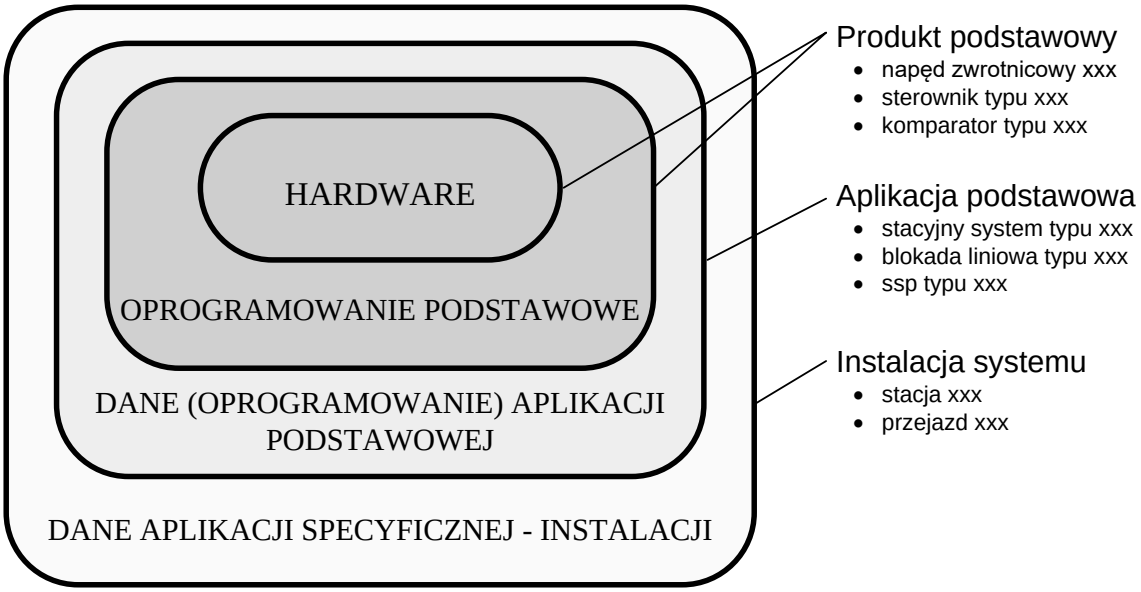
1.2 Sformułowanie problemu

Kontrola stanu urządzeń, którym stawia się określone wymagania pod względem bezpieczeństwa i niezawodności ich działania, a takimi są urządzenia sterowania ruchem kolejowym, jest jednym z ważniejszych zadań, występujących na każdym etapie cyklu życia. Określenia stanu zdatności funkcjonalnej urządzeń srk, w którym urządzenia spełniają swoje zadania, można dokonać wyłącznie na podstawie kontroli zachowania się urządzeń podczas ich użytkowania lub przeprowadzanych testów funkcjonalnych dających obraz o stanie systemu.

W chwili obecnej testy funkcjonalne wykowywane są w procesie użytkowania urządzeń, uzyskiwania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji, co precyzyjnie definiuje Rozporządzenie [74] oraz oceny zgodności podsystemów strukturalnych z technicznymi specyfikacjami interoperacyjności (TSI). Ponadto zagadnienie testowania występuje w wielu dokumentach zarządców infrastruktury kolejowej w formie instrukcji: diagnostyki, eksploatacji, odbiorów itp. Niestety instrukcje te dość nieprecyzyjnie definiują stan funkcjonalny urządzeń srk oraz ogólnie określają zakres prób jaki należy przeprowadzić do kontroli stanu.

Badania certyfikacyjne służą uzyskaniu świadectwa dopuszczenia do eksploatacji urządzeń nowych wprowadzanych na rynek polski i przeprowadza się je zgodnie z Rozporządzeniem [74]. Określony zakres badań koniecznych zawiera szczegółowe wymagania dotyczące prowadzenia badań funkcjonalnych w warunkach nominalnych, przy oddziaływaniu uszkodzeń oraz w warunkach środowiskowych zgodnych z warunkami stosowania. Badania konieczne są ukierunkowane głównie na sprawdzenie bezpieczeństwa działania, a weryfikacją ich wyników są testy funkcjonalności, niezawodności i bezpieczeństwa przeprowadzane z reguły w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Współczesne komputerowe systemy sterowania ruchem kolejowym są projektowane z reguły jako systemy konfigurowalne, czyli konfigurowane przez dane aplikacji. System jest określany jako konfigurowalny jeśli ten sam sprzęt komputerowy i jego oprogramowanie podstawowe, stanowiące platformę sprzętowo – programową systemu, mogą być stosowane do budowy różnych funkcjonalnie systemów i ich instalacji na różnych obiektach. Produkt podstawowy (generyczny) jest wykorzystywany do budowy systemów srk w różnych krajach więc bezpieczeństwo produktu podstawowego (generycznego) zostało sprawdzone,

udowodnione oraz udokumentowane w dowodzie bezpieczeństwa. Wprowadzenie produktu podstawowego na rynek polski wymaga dostosowania go do krajowych zasad prowadzenia ruchu m.in. zasad sygnalizacji (dane aplikacji podstawowej) spełniając wymagania funkcjonalne jakie muszą spełniać urządzenia określonej klasy. Natomiast instalacja systemu na obiekcie (stacji, szlaku) wymaga zastosowania danych specyficznych uwzględniających topologię, warunki ruchowe i otoczenie systemowe. Ogólny model systemu srk jako obiektu badań przedstawiono na rysunku 1.1 [7].



Rys. 1.1 Model systemu komputerowego sterowania ruchem kolejowym

Systemy srk są to systemy które musza spełniać wymagania bezpieczeństwa najwyższego poziomu SIL 4 i ogranicza to możliwość ingerencji w ich strukturę. Złożoność systemów powoduje, iż podstawową formą badań są badania funkcjonalne, w których oceniana jest reakcja systemów na wymuszenia generowane przez operatora i otoczenie systemowe oraz zdarzenia losowe o charakterze zakłóceń i uszkodzeń. Celem tych badań jest więc sprawdzenie wszystkich funkcjonalności systemu pod kątem zgodności z zasadami prowadzenia ruchu i sygnalizacji na sieci kolejowej w Polsce dla aplikacji podstawowej [61]. Ponadto badania przeprowadza się w celu sprawdzenia zgodności z zasadami bezpieczeństwa zawartymi w dokumentacji normatywnej [57], [58], [59].

Kolejną grupą testów są testy przeprowadzane w ramach odbioru aplikacji specyficznej jak również przekazania do eksploatacji. Takie badania przeprowadza się dla urządzeń nowo zabudowanych, po modernizacji urządzeń i również modernizacji urządzeń na sąsiednich posterunkach (wpływ na funkcjonalność) oraz w przypadku napraw czy wymiany komponentów.

Urządzenia nowo zabudowane należy przetestować pod kątem realizacji wszystkich zaimplementowanych funkcji na danym obiekcie. Jest to badanie aplikacji specyficznej dostosowanej wyłącznie do określonego posterunku ruchu. W ramach testów sprawdzana jest zgodność oprogramowania aplikacyjnego i poprawności montażu z projektem i wymaganiami zarządcy infrastruktury. Testy przeprowadza się dla przypadków, w których polecenie nastawcze jest możliwe do zrealizowania i będzie poprawne wykonane przez system (warunki realizacji polecenia spełnione) oraz przypadków w których polecenie nastawcze powinno zostać odrzucone przez system (niespełnione warunki realizacji polecenia). W tej grupie nie realizuje się badań bezpiecznościowych jak podczas testów certyfikacyjnych. Badania po modernizacji urządzeń na posterunku oraz modernizowanych urządzeń na sąsiednich posterunkach i liniach stycznych przeprowadza się w celu potwierdzenia poprawności współpracy urządzeń oraz poprawności działania interfejsów.

Ostatnią grupą testów są testy realizowane w procesie eksploatacji w ramach okresowych badań diagnostycznych. W ramach tej grupy sprawdzeniu podlegają wszystkie funkcje zaimplementowane w urządzeniach pod kątem ich dostępności a sprawdzeń obecnie dokonuje się podczas realizacji planu diagnostycznego zgodnie z instrukcjami diagnostyki i przeglądów [64], [65]. Podczas realizacji zadań na posterunku ruchu niektóre funkcje systemu są bardzo rzadko lub w ogóle nie używane oraz mogą być nieuwzględnione w programie diagnostycznym dla posterunku.

Testy funkcjonalne przeprowadzane są m.in:

- w procesie certyfikacji urządzeń i ocenie zgodności urządzeń nowo wprowadzanych do eksploatacji,
- podczas odbioru urządzeń i układów powiązań (przekazanie do eksploatacji):
  - nowo zabudowanych,
  - po modernizacji,

  - po przebudowie (np. układu torowego stacji, dodaniu nowych funkcji w urządzeniach),
  - czasowo wyłączonych, przed przywróceniem ich do eksploatacji,
- w procesie eksploatacji:
  - cyklicznie w stałych odstępach czasu zgodnie z instrukcjami utrzymania,
  - po stwierdzeniu zakłóceń w działaniu urządzeń,
  - po usunięciu usterek wymagających napraw, wymiany uszkodzonych elementów i regulacji,
  - po wypadkach kolejowych w ramach postępowania komisji ds. wypadków kolejowych.

Każdy powyższy przypadek wiąże się z realizacją określonego zbioru testów. W zależności od konfiguracji funkcjonalnej urządzeń i celu testów, zestaw ten może się różnić ilością przypadków testowych. Należy podkreślić, że badania przeprowadza się na urządzeniach czynnych, będących podstawą prowadzenia ruchu, a na czas prób stosuje się zamknięcia torowe wyłączając część układu torowego z ruchu. Konieczne jest też zaangażowanie personelu będącego na posterunku do realizacji testów do obsługi urządzeń (nastawianie przebiegów, ustawianie kierunku blokady liniowej itp.). Działania te powodują ograniczenie dostępności urządzeń do prowadzenia ruchu i wpływają na sytuację ruchową posterunku, co może powodować perturbacje w ruchu pociągów. Oczywiście prowadzenie ruchu pociągów jest priorytetowe co wpływa również na realizację testów. Na czas przejazdu pociągu rozkładowego badania należy przerwać. Pozytywnym tego elementem jest, że realizacja zadania – nastawienie przebiegu, przejazd pociągu, zwolnienie przebiegu jest również testem kontrolującym stan konfiguracji realizowanego przebiegu.

Podsumowując, przy realizacji badań funkcjonalnych urządzeń srk występują następujące problemy:

- wpływ testu na sytuację ruchową na posterunku czy szlaku,
- ograniczenie dostępności systemu srk do prowadzenia ruchu,
- zaangażowanie dyżurnego ruchu w obsługę urządzeń związaną z realizacją testów,
- wpływ sytuacji ruchowej na realizację testów,
- brak sformalizowanej metody wyznaczania testów dla określonych obiektów.

Niezależnie od celu testu istotne jest ograniczenie wpływu sprawdzenia na dostępność badanych urządzeń. Można to zrealizować odpowiednio układając kolejność testów. W badaniach certyfikacyjnych należy przeprowadzić sprawdzenia wszystkich funkcji i w tym zakresie istnieje możliwość uporządkowania kolejności testów pod kątem czasu ich trwania i przygotowania do próby.

W zakresie grup testów służących przekazaniu do eksploatacji oraz realizowanych w ramach eksploatacji urządzeń zbiór testów możemy ograniczyć do testów funkcji niezbędnych do przetestowania oraz uporządkować zbiór testów pod kątem kolejności wykonywania prób.

Autor brał udział w szeregu pracach realizowanych przez Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej jako Jednostki Upoważnionej do przeprowadzania badań i testów niezbędnych do uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji. Pracami tymi były badania funkcjonalne prowadzone w terenie i laboratoriach urządzeń zależnościowych ESTW L90 5 oraz samoczynnej sygnalizacji przejazdowej RBÜT-PL dla przejazdów kolejowo-drogowych kategorii B i C. Efektem tych prac było uzyskanie świadectwa czasowego na przeprowadzenie szeregu wymaganych przepisami testów funkcjonalnych. Po przeprowadzeniu testów i analizie wyników [30], [34], [37], [40], [41] wystawiane były opinie [31], [32], [35], [38], [39], [43], [44] dotyczące badanych urządzeń. Na podstawie m.in. tych dokumentów Prezes Urzędu Transportu Kolejowego wystawił świadectwa bezterminowe dla badanych urządzeń. Urządzenia te kolejnictwie polskim są stosowane na szeroką skalę.

W celu przeprowadzenia testów ww. urządzeń zostały opracowane programy badań [29], [33], [36], w których określa się funkcje i warunki przeprowadzania prób. Urządzenia srk, szczególnie urządzenia zależnościowe stosowane na posterunkach, są rozbudowane funkcjonalnie oraz w zależności od wielkości stacji również komponentowo co powodowało pracochłonność w budowaniu pełnej bardzo obszernej specyfikacji testów.

Współpraca autora z firmami działającymi na rzecz kolei w zakresie automatyki kolejowej pozwoliła na udział w testach systemu ETCS. Testy były realizowane w ramach budowy nowych urządzeń systemu ETCS na linii jak również modernizacji już istniejących. Zmiany wprowadzone w oprogramowaniu danych jak również rozmieszczeniu elementów oddziaływania wymuszają weryfikację poprawności rozwiązania poprzez realizację testów

dynamicznych z wykorzystaniem lokomotywy wyposażonej w urządzenia pokładowe systemu ETCS. W ramach testów realizowano jazdy pojazdem szynowym sprawdzając poprawność reakcji urządzeń pokładowych na nowe zmienne przekazywane do pojazdu jak również poprawność implementacji danych. Zakres testów obejmował wszystkie elementy, które zostały zmodyfikowane pod kątem sprzętowym czy programowym lub nowo zainstalowane. Na test z reguły składało się nastawienie przebiegu i jego realizacja (jazda pociągu). Z racji wykorzystania taboru i rozległości obszaru, realizacja jednego przejazdu (przebiegu) była czasochłonna. Należy zaznaczyć, że testy realizowane są na czynnych, niekiedy zamkniętych czasowo układach torowych zależnie od decyzji zarządcy infrastruktury. Generuje to duże ograniczenia, w dostępie do infrastruktury i możliwe perturbacje w ruchu pociągów rozkładowych. Ponadto personel posterunku, na którym odbywały się próby był czynnie zaangażowany w realizację testów poprzez odpowiednie wysterowanie urządzeń (nastawianie/rozwiązywanie przebiegów, ustawianie kierunku blokady liniowej itp.) na potrzeby testów.

Zebrane doświadczenia potwierdzają istotny wpływ realizacji testów na dostępność urządzeń i duże zaangażowanie personelu zarówno przeprowadzającego testy jak i obsługującego urządzenia sterowana ruchem (dyżurni, serwisanci).

Metody generowania zbiorów testów oraz ich przeprowadzania są intuicyjnie i często polegają na doświadczeniu osób przeprowadzających próby z realizacji innych prób lub metodą zgadywania błędów. W ten sposób realizowane testy mogą być niekompletne lub nie uwzględniające wszystkich badanych funkcji. Należy zwrócić uwagę, że każda aplikacja specyficzna systemu jest odmienna pod kątem topologii i obszaru sterowania, jak również mogą być implementowane funkcje stosowane w specyficznych przypadkach co może powodować ich pominięcie przy generowaniu sprawdzeń. Ponadto próby mogą być wykonane w niewłaściwy sposób lub niemożliwe do wykonania szczególnie na dużej konfiguracji (np. urządzenia stacyjne na węźle). Wykonanie takich testów może dać niekompletny i fałszywy wynik o stanie funkcjonalnym urządzeń oraz stawiana ocena może okazać się fałszywa.

Podsumowując, programy testów mogą być niekompletne, lub z wieloma powtórzeniami a wynika to z:

- poziomu doświadczenia testera,
- intuicyjnej metody tworzenia testów,

- metod układania programu testów polegającej na:
  - przewidywaniu błędów powstałych w procesie projektowania,
  - szukaniu błędnej realizacji funkcji,
  - nie uwzględnianiu nieprawdopodobnych błędów,
- błędów podczas układania programu testów:
  - nie uwzględnianiu funkcji rzadko używanych lub implementowanych w aplikacji specyficznej,
  - pominięciu istotnych funkcji.

Tematyka testowania funkcjonalnego urządzeń srk jest zbieżna z działaniami określania stanu technicznego urządzeń technicznych. Diagnostyka urządzeń jest szeroko opisana w wielu pracach [23], [45], [46]. Niestety w pracach tych nie uwzględniana jest specyfika urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Skupia się tylko ogólnie na urządzeniach technicznych jako obiekcie badań lub w zastosowaniu do szczególnych przypadków urządzeń produkcyjnych niemniej jednak zagadnienia dotyczące zbiorów testów i ich optymalizacji zostaną zaczerpnięte na potrzeby niniejszej pracy.

Prace zbliżone tematycznie odnoszą się do weryfikacji i testowania urządzeń sterowania ruchem drogowym oraz realizowane są z wykorzystaniem języków opisu sprzętu [21], [22], podobnie jak praca [23], która jest ściśle związana z urządzeniami srk. Zdefiniowano w niej zbiór obiektów pozwalających odwzorować system zależnościowy dowolnego układu torowego. Każdy obiekt został zdekomponowany pod kątem realizowanych funkcji na proste funkcje zależnościowe, które opisywane są za pomocą automatów, teorii zbiorów i grafów. Opracowanie opisu formalnego, pozwoliło na zastosowanie komputerowo wspomaganej specyfikacji i weryfikacji opracowanych funkcji. Specyfikację funkcji zależnościowych zrealizowano w edytorze grafów przejść automatów skończonych FSM pakietu Active-HDL a obiekty wyspecyfikowane zostały w edytorze schematów blokowych BDE. W kolejnych krokach przedstawiono przykłady wykorzystania opisu formalnego do projektowania systemu zależnościowego z wykorzystaniem techniki przekaźnikowej, mikroprocesorowej i z wykorzystaniem układów programowalnych.

Badania kompatybilności elektromagnetycznej opisane w [1], [50] są istotne i niezbędne na etapie dopuszczania do eksploatacji. Uzyskanie pozytywnych wyników badań

kompatybilności EMC (ang. ElectroMagnetic Compatibility) jest konieczne aby uzyskać dopuszczenie do eksploatacji. Badania kompatybilności elektromagnetycznej nie będą przedmiotem niniejszej rozprawy. Rozprawa skupia się na badaniach systemu, którego bezpieczeństwo wewnętrzne systemu zostało sprawdzone i udowodnione w dowodzie bezpieczeństwa, a realizowane będą tylko badania sprawdzające poprawność realizacji funkcji aplikacji.

Jednym z elementów w cyklu życia systemu jest jego walidacja. Etap walidacji obejmuje całościowe sprawdzenie systemu pod kątem zgodności z dokumentacją i specyfikacją wymagań. Zgodnie z [59], [72] działania walidacyjne są niezbędne w celu sprawdzenia systemu z wymaganiami, założeniami i potwierdza jego bezpieczeństwo. Pozycje literaturowe [2], [25], [54], [55], [56] bezpośrednio odnoszą się do walidacji systemu jako podstawowego etapu cyklu życia systemów krytycznych dla bezpieczeństwa, w celu udowodnienia spełnienia ich wymagań. Opisują one istotę testowania na etapie jego rozwoju z wykorzystaniem różnych metod zalecanych przez dokumentację normatywną jak i propozycje rozszerzenia i modyfikacji zalecanych metod. W [54] zaproponowano metodę rozszerzenia metody FTA (ang. Fault Tree Analysis) do FTTD (drzewo błędów z zależnościami czasowymi) oraz analizę metody THR (tolerowanego zagrożenia) do analizy prawdopodobieństwa wystąpienia katastroficznego uszkodzenia w oparciu o stacjonarne procesy Markowa. Publikacja [2] przedstawia zagadnienia w projektowaniu, wdrażaniu, weryfikacji i walidacji Standardu Protocollo Vitale zgodnie z europejskimi normami bezpieczeństwa dla systemów kolejowych w oparciu o narzędzia proponowane w dokumentacjach normatywnych dotyczących kolejnictwa. Artykuły [18], [75] skupiają się na przeglądzie metod badania protokołów wymiany informacji pod kątem zakresu danych, testowania wydajności, testowania kompatybilności, aplikacji scenariuszy biznesowych w scentralizowanych systemach sterowania ruchem CTC chińskich kolei dużych prędkości.

W [25], [56] zaproponowano metodologie metodologię hybrydowego testowania ASF, łączącą techniki czarnoskrzynkowe i białoskrzynkowe oraz metodę generowania przypadku testowego opartego na dwóch głównych językach formalnych (HCSP i Timed Automaton) oraz dwóch popularnych narzędziach (UPPAAL anCoVer). W opracowaniu [54] przedstawiono problematykę walidacji oprogramowania modułu zależnościowego IM i modułu urządzeń zewnętrznych FEC. Zaproponowane środowisko uzupełnia tradycyjne ręczne testy czarnoskrzynkowe i testy wydajności w procesie rozwoju oprogramowania. Testy

walidacyjne są wykonywane przez producenta urządzeń przed dostarczeniem urządzeń i oprogramowania do klienta. Do automatycznej walidacji wykorzystywane są skrypty producenta generujące przypadki testowe oprogramowania. Testerzy decydują, które przypadki testowe mają zostać wykonane a środowisko uruchamia skrypty testowe w trybie wsadowym. Wszystkie przedstawione metodologie i narzędzia skupiają się na zmniejszeniu czasochłonności realizacji wewnętrznych testów, gdyż działania walidacyjne są krytyczne i kosztowne pod względem czasu oraz wysiłku ze względu na dużą złożoność funkcjonalną systemów srk. Zaprezentowane podejście jest odmienne, ponieważ proponowana metoda w rozprawie będzie polegać na badaniu rzeczywistego systemu w warunkach jego zastosowania jako całości przy zastosowaniu rzeczywistych sygnałów wymuszających i rzeczywistych reakcji urządzeń.

Autorzy w artykule [76] zaprezentowali nowatorskie podejście do generowania kombinatorycznych przypadków testowych. Z wykorzystaniem diagramów sekwencji UML opisano dynamiczne zachowanie systemu oprogramowania w celu wykrycia defektów, które wystąpiły w wyniku interakcji między wprowadzanymi ręcznie parametrami wejściowymi systemów. Jest to praca badawcza mająca na celu wygenerowanie różnych kombinatorycznych przypadków testowych i zoptymalizowanie ich metodami Particle Swarm Optimization i Simulated Annealing. Diagnozowanie urządzeń sterowania ma bardzo istotny wpływ na bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Niniejsza problematyka została szeroko opisana w literaturze. Szereg artykułów bazuje na badaniach zwrotnic, sygnalizacji przejazdowych czy sygnalizatora, będących istotnymi elementami infrastruktury sterowania ruchem. W pracy [4] skupiono się na diagnostyce zwrotnicy, zaproponowano monitorowanie wartości prądów nastawczych napędu zwrotnicowego oraz analizę ich wartości. Do analizy i diagnostyki uszkodzeń zastosowano teorię rozmytych sieci neuronowych. Model, na podstawie określonych cech, wybiera rodzaj występującego uszkodzenia ze zdefiniowanego zbioru sześciu rodzajów błędów jako dane wyjściowe na podstawie czterech uszkodzeń będących danymi wejściowymi. Natomiast w [27] zdefiniowano większą ilość błędów oraz uszkodzeń i w oparciu o teorię dowodową Dempstera-Shafera zaproponowano wszechstronną metodę oceny diagnostyki błędów na poziomie podejmowania decyzji w zakresie syntezy informacji. W ten sposób uzyskano zwiększenie dokładności diagnozowania błędów. Podobna problematyka poruszona jest w [17] gdzie przedstawiono koncepcję prostego systemu wykrywania usterek dedykowanego do monitorowania parametrów zwrotnicy (temperatura i

wartość oporu przestawiani) z wykorzystaniem modelu autoregresyjnego. Praca [20] kontynuuje problematykę badania zwrotnic ale z wykorzystaniem metody SVM (ang. Support Vector Machine). Kolejne urządzenia będące tematem prac to systemy zabezpieczenia przejazdów kolejowych. W [28] zastosowano model ARIMA (ang. Autoregressive Integrated Moving Average) oraz wykrywanie uszkodzeń hydraulicznych napędów rogatkowych. Uszkodzenia wykrywane są poprzez porównanie wartości sygnałów jak: prąd i napięcie silnika, ciśnienie hydrauliczne i położenie rogatki z wartościami wzorcowymi. Inne podejście w aspekcie bezpieczeństwa technicznego z zastosowaniem sieci Petriego jest w [26].

Prace [14], [15], [16], [66] skupiające się na monitorowaniu stanu w celu poprawy niezawodności, bezpieczeństwa ruchu i dostępności systemów srk. Do wykrywania i diagnostyki uszkodzeń w typowym obwodzie torowym zastosowano rozmyte sieci neuronowe co opisano w pracy [66]. W artykułach [14], [15] przedstawiono diagnostykę usterek w systemach sygnalizacji kolejowej o stałym odstępie blokowym przy czym zastosowano sieci Petriego. W literaturze można zaleźć publikacje dotyczące diagnostyki urządzenia pokładowych systemów sterowania i kontroli jazdy pociągu, które są już stosowane od dłuższego czasu w kolejnictwie. W [16] zaproponowano metodę diagnostyki uszkodzeń urządzeń pokładowych z zastosowaniem teorii zbiorów przybliżonych a w [76] na przykładzie systemu CTCS-3 z zastosowaniem sieci Bayesowskich.

W artykule [67] opisano zasady przeprowadzania testów funkcjonalnych dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym przeprowadzanych w terenie i laboratoriach. Skupiono się wyłącznie na testach realizowanych w warunkach normalnych (bezusterkowych) i uszkodzeniach obwodu nastawczego sygnalizatora jak przerwy i zwarcia pomiędzy żyłami zasilającymi komory sygnałowe. Przedstawiony jest problem wpływu parametrów sieci kablowej w zależności od warunków pogodowych na wyniki pomiarów napięcia i prądu pobieranego przez żarówki sygnałowe. Ten rodzaj testów też jest wymagany wyłącznie procesie certyfikacji zgodnie z [74] oraz [59] [72] jako badanie reakcji systemu na uszkodzenia i udowodnienie bezpieczeństwa systemu (badania bezpiecznościowe). W nawiązaniu do rozprawy opisane testy częściowo będą uzupełniać grupę certyfikacyjnych testów funkcjonalnych realizowanych metodą proponowaną w niniejszej rozprawie.

Intersujące rozwiązanie jest zaprezentowane w [42]. Zaprezentowana jest problematyka diagnostyki urządzeń sterowania ruchem kolejowym zbudowanych z wykorzystaniem przekaźników a dokładniej na diagnostyce obwodów nastawczych sygnalizatorów. Metoda

opiera się na tabelach diagnostycznych, które z kolei są wykorzystywane do opracowania specjalistycznego oprogramowania, Oprogramowanie to wg autorów pozwoli na szybkie i dokładne wykrywanie defektów układu nastawczego. Oprogramowanie zbudowane na zasadzie pytań dotyczących np. wartości napięć w poszczególnych obwodach, prawidłowości połączenia obwodów i jego elementów, może być używane na urządzeniach przenośnych. Może ono służyć do bezpośredniej diagnostyki obwodów lub do okresowych szkoleń personelu.

Zróżnicowana struktura techniczna urządzeń srk na sieci kolejowej, brak zautomatyzowanej procedury diagnostycznej oraz metod wyznaczania testów jak również wpływ realizacji testów na sytuację ruchową są przyczyną pojęcia tematu pracy. W podjęciu prac nad stworzeniem metody wspomagającej wyznaczanie zbiorów testów utwierdziło również zdobyte doświadczenie autora i zauważone podczas realizacji programów testów negatywne wpływy sprawdzeń na dostępność urządzeń.

Publikacje poświęcone diagnozowaniu urządzeń technicznych nie uwzględniają specyfiki urządzeń srk. Prace związane z urządzeniami srk dotyczące monitorowania stanu i ich diagnozowania skupiają się na podejściach modelowych lub dotyczą szczególnych urządzeń. Temat testów funkcjonalnych pojawia się wyłącznie przy testach oprogramowania a niestety nie jest to w pełni zbieżne z tematem niniejszej rozprawy.

W celu opracowania przydatnego zestawu testów konieczna jest analiza urządzeń srk. Analizie podlegać będzie struktura urządzeń, ich właściwości funkcjonalne oraz diagnostyczne. Wyniki analizy pozwolą na określenie odpowiednich symptomów do obserwacji procesów roboczych i sygnałów wyjściowych generowanych przez badany system.

Wnioski wyciągnięte z analizy prac potwierdzają zasadność podjęcia tematu opracowania metody poprzez realizację zagadnień:

- przeprowadzenia analizy właściwości funkcjonalnych i diagnostycznych urządzeń srk,
- opracowanie modelu kontroli funkcjonowania,
- budowę modelu funkcjonalno-diagnostycznego systemu,
- opracowanie metody tworzenia specyfikacji testów,
- analizę zagadnień optymalizacji i minimalizacji kosztów testów.

Tak, z wykorzystaniem proponowanej metody, przygotowany zbiór testów byłby zbiorem suboptymalnym, zbiorem dającym pełne pokrycie testowe i zbiorem bez zbędnych powtórzeń, minimalizujący czas trwania prób co przekłada się na większą dostępność urządzeń do prowadzenia ruchu w warunkach eksploatacyjnych.

Unikalność proponowanej metody wyznaczania testów wynika z braku rozwiązań ułatwiających generowanie testów dla rzeczywistych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Proponowana metoda skupiona jest na badaniu rzeczywistych urządzeń, tak aby testy nie powodowały nadmiernych perturbacji w ruchu i minimalizowały wpływ realizacji testów na dostępność urządzeń co jest istotnym założeniem pracy.

1.3 Cel i teza pracy

Istotną cechą urządzeń sterowania ruchem kolejowym jest ich dostępność do prowadzenia ruchu oraz niezawodność. Zapewnia to poprawną realizację zadań, gwarantuje oczekiwany poziom bezpieczeństwa. Utrzymanie systemów sterowania ruchem w stanie zdatności wymaga przeprowadzania zabiegów naprawczych, konserwacyjnych w ramach których przeprowadza się testy potwierdzające ich sprawność. Testy są również elementem procesu wdrażania urządzeń do eksploatacji, na etapie badań certyfikacyjnych czy odbiorów. Poprawne określenie stanu urządzeń wymaga odpowiedniego zbioru testów. Odpowiednio przygotowany zbiór testów zapewni pozyskanie właściwych i pełnych informacji o stanie badanego obiektu. Zoptymalizowanie zbioru pozwoli na zmniejszenie ilości sprawdzeń do realizacji i ograniczenie skutków trwania testów na dostępność urządzeń do prowadzenia ruchu.

Teza pracy:

Proponowana w pracy metoda wyznaczania testów funkcjonalnych generuje zbiór testów, wystarczający do określenia stanu urządzeń sterowania ruchem kolejowym.

Cel rozprawy:

Celem pracy jest opracowanie metody wyznaczania zbiorów testów funkcjonalnych służących do kontroli stanu urządzeń sterowania ruchem kolejowym.

2 Systemy sterowania ruchem kolejowym

2.1 Charakterystyka urządzeń sterowania ruchem kolejowym

Urządzenia sterowania ruchem kolejowym służą do zapewnienia bezpieczeństwa oraz sprawności ruchu kolejowego. Wraz z rozwojem techniki zmienił się również sposób realizacji funkcji nastawczych oraz sposoby wprowadzania poleceń, zobrazowania stanu urządzeń i sytuacji ruchowej [73]. W urządzeniach kluczowych wymagane jest posiadanie odpowiedniego klucza zwrotnicowego zależnego od położenia rozjazdu, który po umieszczeniu w skrzyni zależności pozwala na wyjęcie klucza sygnałowego i ustawienie sygnalizatora w położenie „wolna droga". Następne w rozwoju były urządzenia pędniowe mechaniczne. Zasada działania tych urządzeń polega na fizycznym blokowaniu możliwości przestawiania zwrotniczy czy semafora. Pojawienie się napędów i sygnalizatorów elektrycznych rozwinęły się urządzenia elektromechaniczne, które wiązały funkcje zależnościowe z mechanicznych z możliwością sterowania elektrycznych urządzeń wykonawczych. Wraz z pojawieniem się urządzeń przekaźnikowych pojawiły się nowe funkcje związane ze zobrazowaniem sytuacji ruchowej, stanu urządzeń i wprowadzania poleceń oraz wyodrębnienia funkcji zależnościowych [1], [6]. W urządzeniach komputerowych funkcje te zostały wyraźnie rozdzielone i realizowane przez odpowiednie warstwy.

Urządzenia srk można podzielić również wg realizowanych funkcji podstawowych na:

- urządzenia stacyjne,
- urządzenia liniowe,
- urządzenia sygnalizacji przejazdowej.

Ponadto w kolejnictwie polskim stosuje się urządzenia bezpieczeństwa i kontroli jazdy pociągu (bkjp) [73]. Zadaniem urządzeń kontroli prowadzenia pociągów jest kontrola czujności maszynisty, kontrola prędkości jazdy pociągu i kontrola hamowania. Wyróżnić tu można urządzenia typu B i są to urządzenia kontroli czujności maszynisty, których przykładem są urządzenia samoczynnego hamowania (shp) oraz urządzenia typu A i są to urządzenia ETCS. Obecnie użytkowane są urządzenia ETCS poziomu 1 punktowego oddziaływania oraz ETCS poziomu 2 w którym ciągła transmisja danych jest realizowana z wykorzystaniem sieci GSM-R.

Urządzenia instalowane na stacjach mogą obsługiwać ruch wszelkich rodzajów pojazdów szynowych – realizować jazdy pociągowe i manewrowe. Bezpieczna realizacja jazd odbywa się poprzez:

- wybranie elementów drogi przebiegu i ich nastawienie,
- sprawdzenie prawidłowości stanu elementów drogi wybieranego przebiegu (zajętość, położenie, utwierdzenie),
- wykluczenie przebiegów sprzecznych,
- zamknięcie (utwierdzenie) przebiegu i skontrolowanie zamknięcia (utwierdzenia) przebiegu.

Jeżeli którykolwiek z etapów nie zostanie zrealizowany prawidłowo, nie będzie możliwości wyświetlenia sygnału zezwalającego na wjazd/wyjazd ze stacji. Nie rozpatrujemy sygnału zastępczego (Sz) gdyż wyświetlenie jego na semaforze nie jest poprzedzone spełnieniem wyżej wymienionych warunków. Stosowany jest wyłącznie w sytuacjach awaryjnych a bezpieczeństwo prowadzenia ruchu pociągów zależy wówczas wyłącznie od personelu.

Urządzenia prowadzenia ruchu na liniach kolejowych to najczęściej wszelkiego typu blokady liniowe pół lub samoczynne. Umożliwiają regulację ruchu tak, aby dwa kolejne pociągi nie zagrażały wzajemnie swojemu bezpieczeństwu, a w przypadku torów szlakowych o ruchu dwukierunkowym umożliwiają ustalanie kierunku ruchu. Ruch pociągów prowadzony jest z zachowaniem między nimi bezpiecznej odległości. Podstawowymi założeniami są:

- wyświetlenie sygnału zezwalającego na jazdę może wystąpić tylko przy niezajętym odstępie,
- wyświetlenie sygnału zabraniającego jazdy (osłonnego) powinno wystąpić niezwłocznie po zajęciu odstępu blokowego pierwszą osi taboru, lub na skutek usterek niebezpiecznych,
- zmiana kierunku blokady możliwa tylko przy niezajętym szlaku i wyświetlonych sygnałach „stój” na semaforach wjazdowych (pomijając awaryjną zmianę kierunku),
- brak możliwości wyświetlenia sygnałów zezwalających dla obu kierunków.

Urządzenia zabezpieczenia ruchu na przejazdach zwane również sygnalizacją przejazdową mogą być uruchamiane ręcznie przez operatora lub automatycznie przez oddziaływanie taboru. Ostrzeganie użytkowników drogi kołowej odbywa się poprzez świetlny sygnalizator drogowy, uzupełniany zaporami zamykającymi całą lub połowę szerokości jezdni zależnie od kategorii przejazdu. Do najważniejszych założeń dla samoczynnych urządzeń zabezpieczenia ruchu na przejazdach należy zaliczyć:

- niezwłoczne włączenie ostrzegania gdy pojazd szynowy znajdzie się w punktach oddziaływania, uwzględniające odpowiedni czas wyprzedzenia ostrzegania,
- w przypadku jazdy dwóch pociągów po obydwu torach lub jadących w ślad ostrzeganie powinno zostać podtrzymane,
- wyłączenie ostrzegania powinno nastąpić po opuszczeniu skrzyżowania przez tabor.

Analizując warunki jakim muszą odpowiadać omawiane urządzenia można stwierdzić, że we wszystkich urządzeniach występuje system zależnościowy, w których jakiekolwiek działanie oparte jest najczęściej na informacjach pochodzących z układów kontroli niezajętości. Tymi układami są obwody torowe, układy liczników osi czy elementy o punktowym charakterze działania – czujniki koła/osi/pociągu. We wszystkich urządzeniach realizowane są warunki realizacji bezpiecznej jazdy pociągu w sposób uzależniony tzn. kontrola spełnienia określonych warunków jest realizowana za pomocą urządzeń.

W urządzeniach stacyjnych wyświetlenie sygnału zezwalającego na jazdę możliwe jest tylko w przypadku zrealizowania warunków nastawiania przebiegu w danym okręgu sterowania, natomiast w urządzeniach liniowych samoczynnych bezpieczne prowadzenie ruchu pociągów jest realizowane poprzez odseparowanie ich odpowiedniej długością wolnej drogi, która może być stała (stały odstęp blokowy) lub zmienna zależna od prędkości i charakterystyk trakcyjnych taboru (ruchomy odstęp blokowy).

Najbardziej rozbudowanym systemem pod względem funkcjonalnym są urządzenia zależnościowe na stacjach. Wynika to z racji wykonywanej pracy oraz rozbudowanego układu torowego. Realizuj one nastawianie przebiegów pociągowych i manewrowych w warunkach normalnych oraz niekiedy w przypadku usterek czy zakłóceń. Jazdy odbywają się wtedy na sygnał zastępczy, który jest możliwy do wyświetlenia praktycznie bez

uwzględnienia wszelkich zależności (oprócz wskaźnika W24) na pełną odpowiedzialność operatora. Blokada liniowa realizuje tylko jazdy pociągowe (jazdy manewrowe realizowane są tylko w obrębie posterunków) zabezpieczając ruch pociągów poprzez wyświetlenie odpowiednich sygnałów na semaforach odstępowych w zależności od sytuacji ruchowej na szlaku – na podstawie informacji z układów kontroli niezajętości.

Samoczynna sygnalizacja przejazdowa zabezpiecza przejazd poprzez wyświetlenie odpowiednich wskazań na sygnalizatorach. Dla maszynisty są to tarcze ostrzegawcze przejazdowe a dla pojazdów drogowych i pieszych sygnalizatory drogowe. Załączenie sygnalizacji następuje samoczynnie poprzez oddziaływanie taboru na punkty oddziaływania najczęściej czujniki szynowe stwierdzające obecność taboru w odpowiedniej odległości przed przejazdem.

Podsumowując, wszystkie urządzenia sterowania ruchem realizują bezpieczne prowadzenie ruchu taboru kolejowego po torze (stacyjnym, szlakowym), na podstawie informacji z kontroli niezajętości toru czy stwierdzanie obecności taboru i automatyczne uzależnienie od tego stanu podania sygnału zezwalającego na bezpieczną jazdę.

Stacyjne urządzenia srk są najbardziej rozbudowane z punktu widzenia realizowanych funkcji. Możliwość łatwego modyfikowania funkcjonalności urządzeń poprzez implementację odpowiednich funkcji w jednostce logicznej zaciera typowy podział urządzeń (stacyjne, liniowe, ssp). Istnieją systemy sterowania ruchem na stacjach zawierające zaimplementowaną wewnętrzną blokadę liniową. Przykładem jest system ESTW L 90 5 produkcji Thales [78].

Odrębną grupą urządzeń są urządzenia systemu ETCS. Są to urządzenia przekazywania relacji tor-pojazd będące tzw. ”nakładką” na urządzenia warstwy podstawowej. Ich konstrukcja zapewnia poprawną współpracę praktycznie z każdym typem urządzeń zabezpieczenia ruchu a współpraca polega na wyłącznie odczytywaniu sygnałów z urządzeń zależnościowych bez żadnego wpływu na ich działanie za pomocą koderów LEU (Lineside Electronic Unit) dla systemu ETCS poziomu 1 i szczególnych rozwiązań poziomu 2. Na podstawie odczytanych sygnałów generowane są informacje (telegramy) transmitowane do pojazdu szynowego wyposażonego w urządzenia pokładowe. Podstawowe dane zawarte w telegramach to zezwolenie na jazdę oraz prędkość, na podstawie których urządzenia pokładowe wyznaczają krzywe hamowania. Dane te transmitowane są za pomocą balis, europętli zależnie od wyposażenia linii i/albo pojazdu trakcyjnego. Balisa (przełączalna) jest

programowana telegramem wygenerowanym w koderze LEU. Poziom L2 w odróżnieniu od poziomu pierwszego jest typem oddziaływania ciągłego i do przekazywania informacji w relacji z toru do pojazdu jak również z pojazdu do toru wymaga do pracy systemu GSM-R. Balisy również są wykorzystywane ale do przekazywania informacji stałych oraz służą do lokalizacji pojazdu szynowego. Ponadto w specyficznych przypadkach na liniach wyposażonych w system poziomu L2 również stosuje się kodery LEU i balisy przełączalne.

Urządzenia pokładowe zainstalowane na lokomotywie otrzymują telegramy z urządzeń przytorowych za pośrednictwem anteny. Mierzą prędkość i przejechaną odległość, wyliczają aktualne dopuszczalne prędkości tzw. krzywe hamowania wykorzystując dane o pociągu oraz otrzymane dane z urządzeń przytorowych. Informacje te wyświetlane są maszyniście na pulpicie DMI (Driver Machine Interface). Do tych informacji należy m.in długość zezwolenia na jazdę, prędkość maksymalna, wiadomości tekstowe. Jeśli pociąg przekracza bezpieczne limity dopuszczalnej prędkości lub zbliża się do sygnalizatora wskazującego „Stój", system urządzeń pokładowych najpierw ostrzega maszynistę, a następnie przy braku reakcji maszynisty wdraża hamowanie.

Przekazywanie do pociągu wiadomości składają się z telegramów. Telegram składa się z pakietów – niezbędnych informacji do określenia zezwolenia na jazdę oraz nagłówków i zakończeń telegramów. W zakres podstawowo stosowanych w kolejnictwie polskim w poziomie 1 ETCS pakietów wchodzą [68] (w nawiasach podano numer pakietu wg [68]):

- zezwolenie na jazdę (12),
- wartości Zmiennych Narodowych (3),
- linking (5),
- statyczny profil prędkości (27),
- pochylenie miarodajne toru, gradient (21),
- profil trybu (80),
- wiadomości tekstowe (72),
- tymczasowe ograniczenia prędkości (65),
- warunki torowe (68),
- rozkazy i zapowiedzi zmiany poziomu (41) – wjazd lub wyjazd z obszaru objętego systemem.

Wiadomości w ETCS poziomu 1 wysyłane są za pomocą grup balis. Grupa balis może składać się z 1 do 8 balis. Grupa balis może składać się z samych balis nieprzełączalnych lub przełączalnych i nieprzełączalnych. Balisa przełączalna jest balisą wysyłającą telegramy zależne od wskazań sygnalizatorów przytorowych obrazujących sytuację ruchową. Te telegramy są generowane przez kodery LEU i przesyłane do balis za pomocą interfejsu typu C. Balisa nieprzełączalna wysyła stałe komunikaty do urządzeń pokładowych niezależnych od wskazań sygnalizatorów oraz sytuacji ruchowej.

W kolejnictwie polskim zabudowany system ETCS L1 jest w strukturze zdecentralizowanej. Powiązanie z systemami stacyjnymi, blokady liniowej czy sygnalizacji przejazdowych odbywa się poprzez detekcję prądów płynących w obwodach świateł poszczególnych sygnalizatorów, znajdujących się w obszarze nadzorowanym przez system z wykorzystaniem interfejsu S. Dla każdego wskazania generowane są dedykowane dla konkretnego obrazu sygnałowego predefiniowane telegramy różniące się parametrami m.in. prędkości i długości drogi i trybem jazdy tak jak różnią się między sobą drogi jazdy przebiegów.

2.2 Niezawodność i dostępność

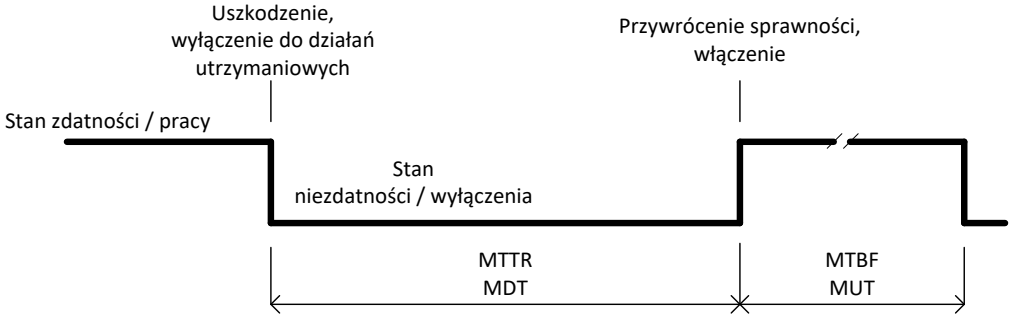
Urządzenia wprowadzono ze względu na powtarzalność i niezawodność działania w stosunku do człowieka oraz wymaga się od nich wysokiej dostępności. Aby zapewnić wyskoki poziom bezpieczeństwa, wymusza się odpowiednią konstrukcję i/oraz strukturę urządzeń. Zgodnie z zaleceniami normatywnymi wyróżniamy cztery poziomy bezpieczeństwa zależne od przeznaczenia urządzeń. Poziom 1 odnosi się do urządzeń niezwiązanych z bezpieczeństwem ruchu (np. informacyjne dla podróżnych), ich uszkodzenie nie spowoduje sytuacji niebezpiecznej. Poziom 4 jest poziomem najwyższym, a potencjalna usterka skutkuje utratą zdrowia i życia ludzkiego. W większości przypadków dla urządzeń srk warstwy zależnościowej i wykonawczej wymagany jest poziom 4, rzadziej 3. Obecnie wg dokumentacji normatywnej PN-EN 50129 poziom SIL określany jest poprzez TFFR (Tolerable Functional Failure Rate) – dopuszczalny współczynnik utraty funkcji związanej z bezpieczeństwem, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zależność pomiędzy SIL a TFFR

Poziom SIL	**Wartość TFFR (na h, funkcję)**
4	$10^{-9} \leq TFFR < 10^{-8}$
3	$10^{-8} \leq TFFR < 10^{-7}$
2	$10^{-7} \leq TFFR < 10^{-6}$
1	$10^{-6} \leq TFFR < 10^{-5}$

Dostępność urządzeń jest to zdolność do przebywania w stanie pozwalającym na prawidłowe wykonywanie swoich funkcji w określonych warunkach i określonym czasie lub w ustalonym odstępie czasu przy spełnieniu wymogów środków zewnętrznych [57]. W diagnostyce technicznej używa się pojęcie zdatności. Maszyna znajduje się w stanie zdatności wtedy, jeżeli wartości parametrów lub cech stanu znajdują się w dopuszczalnych granicach. Jeżeli wartości są przekroczone maszyna znajduje się w stanie niezdatności. Można wyróżnić stan:

- zdatności funkcjonalnej - oznaczający możliwości maszyny do realizacji zadanej funkcji zgodnie z przeznaczeniem,
- zdatności zadaniowej, oznaczający możliwości maszyny do realizacji zadań w wyznaczonych warunkach eksploatacyjnych przy określonych pobudzeniach.



MTTR – średni czas potrzebny do naprawy awarii (Mean time to repair)
MTBF – średni czas pomiędzy awariami (Mean time between failures)
MDT – średni czas wyłączenia, braku działania (Mean down time)
MUT - średni czas poprawnej pracy (Mean up time)

Rys. 2.1 Graficzne zobrazowanie dostępności urządzeń z opisem stanów [źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN 50126]

Przedstawiony diagram (rys. 2.1) definiuje dostępność A systemu jako część czasu, gdy system prawidłowo realizuje swoje funkcje. Przy założeniu, że średni czas naprawy MTTR = MDT, dostępność można przedstawić wzorem:

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT} \leq 1 \tag{2.1}$$

Czas MDT można zdefiniować jako czas przestoju, czas wyłączenia systemu (jako całość w przypadku usterki jednostki zależnościowej) lub elementu (zwrotnicy, sygnalizatora, sekcji licznika osi), w którym system (element) jest w stanie uszkodzenia, planowego obsługiwania czy konserwacji. Niezależnie od przyczyn jakie wprowadziły urządzenia srk do stanu MDT, system jako całość lub jego część jest w stanie niedostępności całkowitej lub częściowej przez co nie może być w pełni wykorzystany do prowadzenia ruchu zgodnie ze swoim przeznaczeniem.

Jako składowe przedziału czasu MDT, można wyróżnić rozpatrując usterkę:

- czas niewykrycia usterki przez obsługę lub operatora systemu,
- czas opóźnień logistycznych, administracyjnych i technicznych,
- czas naprawy,
- czas testowania urządzeń po naprawie.

Przyczyny wprowadzenia systemu w stan niedostępności wynikają nie tylko z usterek technicznych systemu. Na niedostępność systemu wpływa również realizacja zadań utrzymaniowych, na czas których, zależnie od zakresu, system lub jego elementy są wyłączone z prowadzenia ruchu. Czas MDT również jest więc i czasem obsługi urządzeń, na który składa się planowa diagnostyka oraz konserwacja urządzeń oraz czas poświęcony na realizację testów związany z obsługą i wspomnianym czasem naprawy.

Usterka czy realizacja badań kontrolnych nie wpływa na niedostępność całego systemu sterowania ze względu na jego wielozadaniowość i nadmiarowość funkcjonalną. Można to przedstawić jako iloraz funkcji niemożliwych do zrealizowania do wszystkich funkcji realizowanych przez system. Funkcją w systemie srk jest zadanie – nastawienie przebiegu czy realizacja polecenia indywidualnego. Wszystkimi funkcjami więc są wszystkie przebiegi i

polecenia możliwe do zrealizowania na posterunku. Dostępność systemu ze względu na jego cechę wielozadaniowości będzie przyjmować wartości z przedziału <0, 1> i odnosi się na daną chwilę szacowania, co przedstawić można wzorem:

$$\mathrm{A_f} = \frac{\sum_{p=1}^{n} f_{nd_p}}{\sum_{q=1}^{m} f_q} \tag{2.2}$$

gdzie:

A_f – wskaźnik dostępności funkcjonalnej,

f_{nd} – funkcje (zadania) niedostępne w wyniku uszkodzenia/konserwacji i-tego elementu konfiguracji zadania,

f – funkcje (zadania) realizowane przez system srk.

Zależnie od topologii stacji uszkodzony czy aktualnie podlegający obsłudze technicznej element np. pierwszy rozjazd w głowicy stacji czy semafor wjazdowy, może wpłynąć na niedostępność większości zadań realizowanych na stacji. Niedostępność elementu, spowoduje brak możliwości realizacji zadań, w których to urządzenie jest elementem konfiguracji funkcjonalnej zadania. Badanie elementu wykorzystywanego w wielu zadaniach spowoduje więc największe straty dostępności systemu. Opisać to można współczynnikiem wagi elementu systemu:

$$W_{ek} = \frac{\sum_{p=1}^{n} f_{ek_p}}{\sum_{q=1}^{m} f_q} \tag{2.3}$$

gdzie:

W_{ek} – współczynnik wagi i-tego niedostępnego elementu systemu,

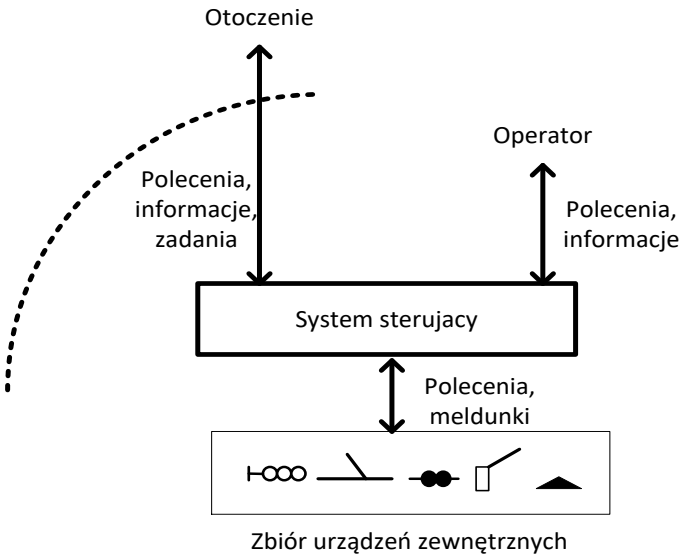
f_{ek} – funkcje (zadania), których i-ty element jest elementem konfiguracji zadania.

Ograniczenie czasu poświęconego na wykonanie testów wpłynie pozytywnie na dostępność funkcjonalną systemu szczególnie elementów, które mają udział w realizacji większości zadań. Takim elementem jest np. rozjazd widziany jako pierwszy od strony szlaku. Niedostępność takiego elementu uniemożliwia realizację wszystkich zadań w tej głowicy stacji.

2.3 Definicja systemu srk

Badania funkcjonalne urządzeń realizowane są z poziomu systemu srk więc konieczne jest przedstawienie definicji systemu i jego otoczenia.

System sterowania ruchem kolejowym jest zbiorem urządzeń sterujących i sterowanych (elementów) i obejmuje swoim działaniem określony obszar sterowania. Urządzenia te tworzą strukturę techniczną systemu sterowania a ich powiązania stanowią strukturę funkcjonalną systemu srk. Struktura systemu jest niepowtarzalna dla każdego obszaru sterowania. Sterowanie elementami odbywa się z wykorzystaniem ściśle określonych algorytmów sterowań. Ogólną strukturę systemu srk przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2 System srk i jego otoczenie

Urządzenia srk na potrzeby niniejszej pracy rozumiane będą jako zbiór urządzeń i personelu:

- systemu sterującego,
- obiektów przytorowych sterowanych i kontrolowanych:
  - napędy (zwrotnicowe, wykolejnicowe, rogatkowe, …),
  - sygnalizatory (stacyjne, odstępowe, tarcze ostrzegawcze, tarcze ostrzegawcze przejazdowe…),
  - urządzeń kontroli niezajętości (liczniki osi, obwody torowe, …),
  - urządzenia systemu ETCS (balisy, kodery LEU),
- operator.

Otoczeniem systemu poza środowiskiem naturalnym są sąsiednie posterunki ruchu, szlaki styczne, sygnalizacje przejazdowe. Konieczna jest współpraca systemu srk z otoczeniem wynikająca z przemieszczania się pojazdu szynowego z jednego obszaru sterowania do drugiego.

Sygnalizacje przejazdowe często są urządzeniami autonomicznymi, działającymi niezależnie od pozostałych urządzeń sterowania. Gdy warunki usytuowania przejazdu kolejowo-drogowego wymuszają umieszczenia stref oddziaływania czujników włączających w obszarze stacji, stosuje się powiązanie urządzeń ssp ze stacyjnymi [73]. Powiązanie polega na zainicjowaniu przez urządzenia stacyjne zamknięcia przejazdu kolejowo-drogowego i uzależnieniu sygnału na semaforze od stanu funkcjonalnego sygnalizacji przejazdowej.

W każdym przypadku współpracy z otoczeniem przekazywane są sygnały sterujące, które są zależne od stanu funkcjonalnego współpracujących urządzeń.

2.4 Struktura stacyjnych urządzeń srk

Urządzenia sterowania ruchem, których podstawowym zadaniem jest zapewnienie w czasie rzeczywistym bezpiecznej realizacji jazdy pojazdów szynowych, niezależnie od technologii wykonania wymagają udziału operatora. Personel realizując zadania posterunku ruchu i realizując rozkład jazdy, wprowadza polecenia nastawcze, które są wykonywane przez system po spełnieniu odpowiednich warunków bezpiecznej realizacji poleceń.

Obecnie podczas modernizacji sieci kolejowej instalowane są urządzenia komputerowe. Stanowią one n-kanałową strukturę, składającą się z modułów w odpowiedniej konfiguracji wraz z powiązaniami i oprogramowaniem. W ich strukturze rozróżnić można zasadniczo trzy warstwy sprzętowe: interfejsu operatora, jednostki zależnościowej i sterowników lokalnych Struktura warstw przedstawiona jest na rys. 2.3. Każda z warstw może być mniej lub bardziej widoczna i rozbudowana zależnie od przeznaczenia urządzeń.

Warstwa operatora, będąca interfejsem pomiędzy dyżurnym ruchu a urządzeniami, składa się z elementów zobrazowania i wprowadzania poleceń sterujących. Z reguły są to monitory z odwzorowanym układem torowym posterunku i komunikatami diagnostycznymi przekazujące informacje o stanie urządzeń sterowania (systemu) i sytuacji ruchowej. Obraz wyświetlany na monitorze ma postać schematycznego rysunku układu torowego na czarnym tle. Na obrazie musi być zachowana zgodność rozmieszczenia symboli z wzajemnym geograficznym

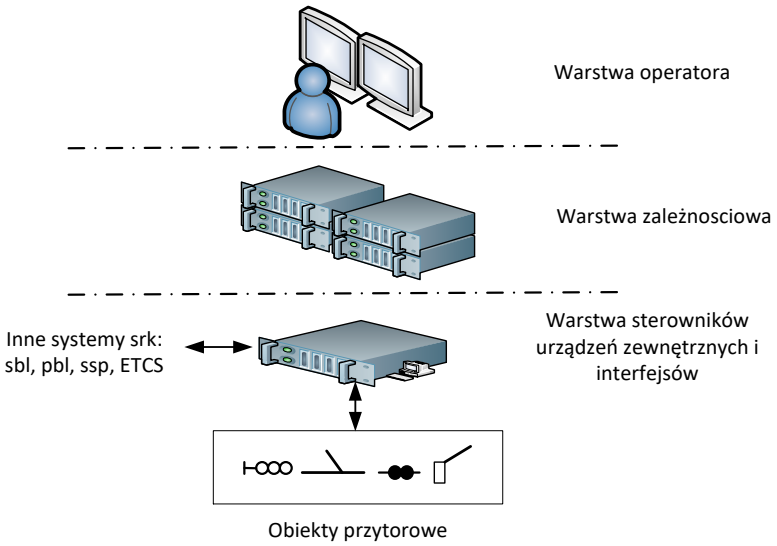
rozmieszczeniem elementów fizycznych na stacji. Ze względu na optymalne wypełnienie ekranu dopuszcza się stosowanie skali. Na zobrazowaniu znajduje się również wzorzec kolorów oraz wskaźniki służące do kontroli odświeżania obrazu i otrzymywania danych z systemu zależnościowego. Przekazywane są również komunikaty diagnostyczne i alarmowe związane z koniecznością wykonania konkretnego działania przez pracownika obsługi.

Do wprowadzania poleceń wykorzystywane są klawiatura z myszą. Wszystkie stany urządzeń kontrolowanych przez system mają odwzorowanie na monitorze w postaci elementów zobrazowania - odpowiednich symboli i barw określających aktualny status komponentów systemu. Polecenia nastawcze przekazywane są do realizacji w warstwie zależnościowej.

Warstwa zależnościowa realizuje wszystkie funkcje związane z bezpieczeństwem ruchu. Kontroluje warunki bezpiecznej realizacji poleceń wprowadzonych przez operatora i uniemożliwia ich wykonanie w sposób zagrażający bezpieczeństwu ruchu. Kontrola polega na sprawdzeniu dostępności oraz statusu elementów wchodzących w konfigurację funkcjonalną danego przebiegu, wydaniu poleceń sterujących (doprowadzeniu do żądanego stanu) i zablokowaniu elementów przed wykorzystaniem ich w innym równolegle realizowanym zadaniu.

Warstwa sterowników lokalnych będąca interfejsem systemowym pomiędzy urządzeniami zewnętrznymi (przytorowymi) jak napędy zwrotnicowe, rogatkowe, sygnalizatory, układy kontroli niezajętości toru itp. odpowiedzialna jest za sterowanie, kontrolę i przesyłanie do warstwy zależnościowej aktualnego stanu urządzeń przytorowych, komunikatów diagnostycznych oraz realizację poleceń sterujących. W warstwie tej realizowane jest również powiązanie z innymi autonomicznymi urządzeniami zabezpieczenia ruchu jak sygnalizacje przejazdowe, blokady liniowe, układy kontroli niezajętości czy urządzenia zależnościowe innych producentów.

Każda warstwa sprzętowa zawiera dedykowane oprogramowanie realizujące odpowiednie funkcje i zależności. Wszystkie warstwy komunikują się pomiędzy sobą bezpiecznymi kanałami z wykorzystaniem odpowiednich protokołów transmisji.



Rys. 2.3 Podział stacyjnego systemu srk na warstwy na przykładzie systemu w technologii komputerowej

Systemy sterowania ruchem w obejmują swoim działaniem określony obszar sterowania. Sterowane elementy będące w tym obszarze tworzą strukturę systemu sterowania a ich powiązania stanowią konfigurację funkcjonalną urządzeń. W komputerowych urządzeniach srk wszystkie elementy sterowane mają w systemie odwzorowanie w formie obiektów logicznych. Obiekty te charakteryzują się tzw. statusem i może to być:

- stan fizyczny obiektu np. aktualne położenie zwrotnicy, stan niezajętości odcinka torowego,
- stan logiczny obiektu:
    - wynikający z realizacji zadania procesu sterowania ruchem np. utwierdzenie,
    - wynikający z realizacji polecenia operatora np. zastopowanie,
    - wynikający z realizacji procesu utrzymania, zakłóceń lub uszkodzeń.

W celu przybliżenia pojęcia statusu poniżej przedstawiono przykładowo możliwe stany fizyczne oraz logiczne w jakich może znajdować się zwrotnica.

Stany fizyczne zwrotnicy:

- położenie:
    - zwrotnica w położeniu prawym (na wprost),
    - zwrotnica w położeniu lewym (przełożona),
    - zwrotnica w położeniu pośrednim (w trakcie przestawiania),

- zajętość przez tabor:
    - niezajęta,
    - zajęta,
- kontrola:
    - zwrotnica w trakcie przestawiania (brak kontroli),
    - brak kontroli położenia zwrotnicy w wyniku zakłóceń/uszkodzeń.

Przykładowe stany logiczne zwrotnicy:

- brak danych o elemencie sterowanym,
- zajętość logiczna (wynikająca np. z procedury resetu sekcji licznika osi),
- zastopowana dla przestawiania,
- zamknięta dla przebiegowego nastawiania,
- utwierdzona (w przebiegu pociągowym, manewrowym),
- w drodze ochronnej,
- w ochronie bocznej.

W grupie urządzeń przytorowych należy wyróżnić elementy systemu ETCS jakimi są balisy przełączalne i nieprzełączalne, koder LEU wraz z powiązaniem do urządzeń nastawczych i interfejsami.

W zasadzie rozpatrując urządzenia ETCS praktycznie nie można wyróżnić innego stanu/statusu ich podzespołów oprócz stanu sprawności lub niesprawności funkcjonalnej. Balisa jest transparentnym transmiterem danych, wysyła tylko te dane którymi została zaprogramowana przez koder LEU, lub telegramem stałym. Jej działanie nie jest zależne czy uzależnione od innych urządzeń. Koder LEU odczytuje wartości prądu w obwodach sygnałowych i na tej podstawie generowany jest adekwatny telegram do wskazania. Przesyłany jest on w sposób ciągły do połączonych przy pomocy kabla interfejsu C balis przełączalnych. Koder przytorowy LEU wykrywa prądy płynące w obwodach świateł bez wpływu na parametry obwodu sygnałowego sygnalizatora. Koder podobnie jak balisa nie są uzależnione od pozostałych urządzeń. Stan niezdatności kodera będzie wykrywany i w razie usterki będzie przechodził on do stanu bezpiecznego. Zapewnione jest to poprzez dwukanałową strukturę sprzętową i programową. Przejście do stanu bezpiecznego kodera

LEU wymusza wygenerowanie domyślnego telegramu informującego o usterce kodera, który transmitowany jest do balisy. Jeżeli usterka obejmuje interfejs C lub moduł transmisji balisa wykrywa brak komunikacji i transmituje telegram domyślny. Telegram domyślny nie zezwala na dalszą jazdę pociągu.

Przedstawienie wszystkich możliwych stanów w jakich może znajdować się przedstawiony element systemu w postaci jednego grafu przejść jest bardzo skomplikowane ze względu na mnogość stanów i wynikających przejść pomiędzy nimi. Zwrotnica może znajdować się w wyróżnionych stanach fizycznych z dodatkowo nadanym stanem logicznym w systemie (niezajęta, na wprost, zastopowana). Należy zauważyć, że adekwatne stany fizyczne i logiczne urządzeń występują dla wszystkich elementów sterowanych systemu srk. Zmiana stanu fizycznego lub logicznego jednego lub kilku elementów powoduje zmianę stanu całego systemu. Z tego względu opracowanie modelu formalnego systemu srk uwzgledniającego funkcjonalność urządzeń, ich właściwości diagnostyczne, strukturę systemu i stan elementów pozwoli na opracowanie metody kontroli realizacji funkcji w procesie sterowania ruchem z wykorzystaniem charakterystycznych istotnych cech elementów systemu.

2.5 Własności funkcjonalne i diagnostyczne urządzeń srk

Zadaniem systemu srk jest realizacja określonych zbiorów zadań - przebiegów pociągowych, manewrowych oraz niezbędnych funkcji, zapewniających zamierzone i bezpieczne sterowanie w rozumieniu procesu sterowania. Do realizacji zadań przydzielane są określone urządzenia, które stanowią konfiguracje funkcjonalne zadań. W danej chwili możliwe jest realizowanie przez system kilku zadań (przebiegów) nie wykluczających się wzajemnie czyli nie wymagających wykorzystania tych samych elementów biorących udział w realizacji innego zadania. Liczba jednocześnie realizowanych zadań zależna jest od powiazań funkcjonalnych pomiędzy elementami systemu oraz struktury zbioru zadań.

Gdy system sterowania znajduje się w stanie pełnej sprawności funkcjonalnej poszczególne zadania realizowane są w ściśle określonej i takiej samej konfiguracji. Realizacja wymaga dynamicznej zmiany stanu urządzeń wchodzących w konfigurację zadania zgodnie z określonymi dla urządzeń algorytmami sterowań. W przypadku usterek zadania mogą być zrealizowane wyłącznie w trybie awaryjnym (np. jazda na sygnał zastępczy Sz) lub pozostać niezrealizowane. Realizacja określonego zadania w stanie usterki w innej

konfiguracji nie jest możliwa, będzie to inne zadanie (inny przebieg). Z punktu widzenia realizacji procesu transportowego istnieje konieczność przejazdu pociągu przez posterunek ale jazda odbędzie się z wykorzystaniem innej konfiguracji (jazda wariantowa lub po innym torze) niż pierwotnie założona. Uszkodzenia elementów nie wchodzących w konfiguracje aktualnie realizowanych zadań są tolerowane przez system i nie mają wpływu na ich realizacje niezależnie czy zostały wykryte czy nie oraz nie mają wpływu na realizacje zadań.

Zrealizowanie zadania wiąże się z uwolnieniem elementów i możliwością ich wykorzystania w kolejnym zadaniu. W sytuacji awaryjnej możliwe jest zwolnienie elementów poprzez odpowiednie polecenia wydane przez operatora.

2.5.1 Monitorowanie stanu podczas realizacji zadań

W procesie eksploatacji urządzeń srk można wyróżnić dwa rodzaje kontroli stanu urządzeń tj. ciągłą kontrolę funkcjonowania urządzeń (monitorowanie) oraz kontrolę okresową. Kontrola funkcjonowania dzięki której określa się zbiór właściwości technicznych badanego urządzenia może być realizowana podczas realizacji procesu sterowania ruchem oraz na podstawie przeprowadzonych prób w trakcie realizacji procesu lub przerwach w ruchu. Badaniu podlegają cechy charakteryzujące funkcjonowanie, to znaczy wykonywanie zadań do jakich system srk jest przeznaczony.

Kontrola okresowa realizowana zgodnie z harmonogramami obejmuje zasadniczo wszystkie urządzenia systemu (komponenty konfiguracji). Kontrola może być kontrolą jakościową polegającą na oględzinach i sprawdzeniu stanu obudowy, poprawności i pewności zamocowania elementów i przyłączy kablowych, oraz kontrolą ilościową polegającą na wykonaniu pomiarów określonych parametrów urządzenia lub odpowiednich sygnałów czy poziomów prądów i napięć. Kontrola okresowa wymaga czasowego wyłączenia badanego urządzenia z użytkowania co może generować perturbacje w ruchu pociągów.

Dyżurny ruchu wraz z personelem pomocniczym będący operatorem urządzeń jest istotnym i niezbędnym elementem systemu sterowania. Razem z obsługiwanymi urządzeniami srk tworzą tzw. system decyzyjno-kontrolno-sterujący realizujący proces sterowania ruchem w kontrolowanym obszarze. Sterowanie odbywa się z wykorzystaniem i na podstawie niezbędnych informacji jak: rozkład jazdy, sytuacja ruchowa w obszarze

sterowania, stan i dostępność urządzeń sterowanych, zależnościowych i nastawczych. W trakcie realizacji procesu sterowania wykonywane są działania:

- decyzyjne o kolejności realizacji zadań,
- operacyjne:
  - tworzenia konfiguracji funkcjonalnych,
  - dozorowania jazdy pociągu,
- kontrolne,
- sterowania ruchem w sytuacjach awaryjnych.

Podczas realizacji procesu sterowania ruchem wykonywane są podobne operacje polegające na wyborze kolejności realizacji zadań i adekwatnej do zadania konfiguracji systemu. Jedynie w sytuacjach awaryjnych proces może być realizowany wyłącznie przez personel szczególnie podczas awarii czy utraty wiarygodności przez urządzenia zależnościowe i nastawcze. Na proces sterowania ruchem na stacji składają się jednakowe operacje wykonywane sekwencyjnie niezależnie od sposobu ich realizacji:

- oczekiwania na zadanie,
- przygotowanie i nastawianie drogi przebiegu,
- dozorowanie jazdy pociągu i zwolnienia przebiegu.

Faza oczekiwania na zadanie – w tej fazie operator ma możliwość sprawdzenia poprawności zobrazowania układu torowego i elementów przytorowych, aktualności danych (kontrola życia) przy pomocy symboli i barw zgodnych z katalogiem zobrazowania. Dodatkowo dyżurny otrzymuje diagnostyczne komunikaty tekstowe o stanie urządzeń wchodzących w skład konfiguracji systemu. Na podstawie tych danych można określić predyspozycje konfiguracji do realizacji zadania i podjęcia decyzji o realizacji przebiegu.

Realizacja przebiegu składa się z dwóch etapów: przygotowania i nastawiania drogi przebiegu. Na etapie przygotowania drogi przebiegu operator oczekując na zadania napływające do systemu, kontroluje działanie urządzeń zbliżania pociągu, funkcjonowania zobrazowania elementów blokady liniowej, układu torowego posterunku/szlaku i stanu niektórych elementów jak sprawność sygnalizatora, położenia zwrotnicy czy stanu odcinków torowych i zwrotnicowych. W drugim etapie - nastawiania przebiegu operator ma możliwość sprawdzenia urządzeń wybierających i wprowadzających polecenia nastawcze a także ich

realizację przez system. Reakcją na polecenia będzie doprowadzenie urządzeń do żądanego stanu, utwierdzenie elementów w drodze przebiegu, wyświetlenie światła zezwalającego na semaforze. Informacja o zrealizowaniu polecenia będzie przedstawiona w postaci odpowiedniego zobrazowania stanu elementów i informacji na monitorze diagnostycznym.

W fazie dozorowania jazdy pociągu kontrolowana jest konfiguracja systemu w interakcji z przejeżdżającym taborem. Operator obserwując elementy zobrazowania na monitorze dokonuje kontroli na podstawie przemieszczania się taboru w kontrolowanym obszarze. Kolejność zajmowania, zwalniania sekcji torowych i zwrotnicowych przebiegu, prawidłowość zwalniania całości lub części przebiegu oraz osłonięcia sygnałem stój drogi jazdy świadczy o poprawności wykonania zadania. Częściowo możliwa jest kontrola ciągłości składu przejeżdżającego taboru.

System ETCS również można kontrolować realizując zadania posterunku ruchu. Przejazd pociągu z wykorzystaniem urządzeń ETCS pozwala na kontrolę funkcjonalną urządzeń warstwy przytorowej w interakcji z urządzeniami pokładowymi. Reakcja urządzeń pokładowych i ich oddziaływanie na układy lokomotywy będzie możliwa do zaobserwowania przez maszynistę. Przy prawidłowym działaniu urządzeń maszynista ma możliwość obserwacji wskazań na panelu DMI jak prędkość dozwolona, długość zezwolenia na jazdę, wiadomości tekstowe, anonse zmiany poziomu i trybu jazdy i odpowiedniej reakcji na komunikaty. Świadczyć to będzie o prawidłowej pracy balis i koderów LEU, prawidłowym podłączeniu i ich zaprogramowaniu. W przypadku usterki urządzeń przytorowych odebrany telegram domyślny spowoduje zatrzymanie pociągu, oraz wyświetlenie odpowiednich komunikatów na panelu DMI. W przypadku błędnej implementacji danych w telegramach na etapie projektowania oprogramowania również dojdzie do bezpiecznej reakcji urządzeń pokładowych oraz będzie to możliwe do zauważenia przez maszynistę. Wariant ten jest mało prawdopodobny podczas eksploatacji urządzeń, gdyż oprogramowanie jest weryfikowane pod kątem spójności i poprawności implementacji danych. Następnie przeprowadzane są testy w różnych wariantach i sytuacjach ruchowych przed oddaniem urządzeń do eksploatacji co pozwoli na wychwycenie błędów.

Podsumowując, z punktu widzenia realizacji funkcji przez system sterowania ruchem kolejowym można rozróżnić stan:

- pełnej zdatności funkcjonalnej, który oznacza pełną zdolność systemu srk do realizacji wszystkich zadań,
- częściowej niezdatności funkcjonalnej, który oznacza niezdolność systemu do realizacji niektórych zadań,
- całkowitej niezdatności funkcjonalnej, który oznacza niezdolność systemu srk do realizacji wszystkich zadań.

Przy czym należy zauważyć, że w stanie częściowej niezdatności funkcjonalnej realizacja zadań możliwych do wykonania przez system musi odbyć się z zachowaniem wymaganego poziomu bezpieczeństwa.

3 Badania diagnostyczne w cyklu życia systemu srk

3.1 Badania diagnostyczne obiektów technicznych

Określenie aktualnego stanu obiektu technicznego, a takim są urządzenia srk, jest możliwe tylko w wyniku przeprowadzenia badań diagnostycznych. Proces badań diagnostycznych urządzeń polega na wykonaniu określonego zbioru sprawdzeń oraz analizie uzyskanych wyników. W procesie tym następuje ocena wartości cech stanu urządzenia, przetwarzanie zebranych informacji oraz wnioskowanie służące wypracowaniu diagnozy.

Cel realizacji badań diagnostycznych zależy jest od momentu ich wykonania oraz momentu, którego dotyczy ocena stanu technicznego urządzenia. Wyróżnia się cztery formy działań diagnostycznych: diagnozowanie, genezowanie, prognozowanie i dozorowanie. Diagnozowanie polega na określaniu stanu urządzenia w chwili, w której realizowane są badania. Dozorowanie, nazywane także monitorowaniem, obejmuje bieżącą obserwację stanu technicznego urządzenia (systematyczne odnawianie diagnozy). Genezowanie pozwala określić stan urządzenia w chwilach poprzedzających wykonanie badań i odtworzenie kolejności zaistniałych w przeszłości stanów obiektu. Prognozowanie polega na przewidywaniu stanów urządzenia srk w przyszłości. Przewidywania przyszłego i przeszłego stanu urządzenia można określić posiadając:

- informacje o obecnym stanie obiektu czyli diagnozy,
- znajomość niektórych stanów obiektu poprzedzających diagnozę,
- znajomość rozkładów prawdopodobieństw zmian stanów maszyny w zależności od rodzaju realizowanych zadań i oddziaływania otoczenia.

Celem badań funkcjonalnych jest uzyskanie informacji o rzeczywistej i prawidłowej realizacji funkcji w czasie przeprowadzania badań więc działania prognozowania i genezowania nie są w tym przypadku pomocne. Diagnozowanie i dozorowanie natomiast dostarczają informacji o aktualnym stanie obiektu w chwili przeprowadzenia badań. więc tylko ta forma działań jest przydatna i zbieżna z tematyką pracy.

W procesie diagnozowania przy badaniach stanu technicznego obiektów na ogół wyróżnia się dwie fazy:

- kontrolę zdatności (kontrolę stanu, kontrola funkcjonowania),
- lokalizację uszkodzeń.

W procesie kontroli stanu zasadniczo stosuje się metody umożliwiające uzyskanie ilościowych wyników kontroli. Kontrola funkcjonowania jest najbardziej ogólnym procesem badania stanu obiektu w całości, bez rozróżniania stanu jego elementów a zadaniem kontroli jest określenie zdatności funkcjonalnej badanego obiektu czyli zdolności do realizacji zadań. Kontrolę tą przeprowadza się w czasie nominalnej pracy urządzenia, bez naruszania jego struktury. Badaniu podlegają cechy charakteryzujące funkcjonowanie czyli wykonywanie zadań do jakich urządzenie jest przeznaczone. Cechy te są niemierzalne więc badanie polega na obserwacji zachowania się systemu i sprawdzaniu poprawności realizacji zadań. Kontrola funkcjonowania jest zazwyczaj kontrolą bieżącą (monitorowanie) lub okresową realizowaną w trakcie użytkowania urządzeń. Można ją realizować obserwując działanie urządzeń w trakcie normalnej eksploatacji lub z wykorzystaniem określonych testów. Celem badania jest stwierdzenie, czy urządzenie jest zdolne do realizacji założonych funkcji.

Biorąc pod uwagę stan zdatności i ocenę możliwości realizacji zadań przez badane urządzenia można wyróżnić stan zdatności funkcjonalnej. Określa on zdolność urządzeń do realizacji zadanych funkcji zgodnie z przeznaczeniem i zgodnie z wymaganiami dokumentacji normatywnej i technicznej. Analogicznie niezdatność funkcjonalną definiujemy jako brak zdolności urządzenia do realizacji zadanych funkcji.

W przypadku stwierdzenia niezdatności obiektu, przeprowadzana jest druga faza - lokalizowanie uszkodzonego elementu. Polega ona na rozpoznawaniu stanu elementów składowych obiektu w celu wymiany czy naprawy obiektów niezdatnych. W trakcie badań funkcjonalnych nie koncentrujemy się na tym dlaczego badana funkcja nie jest realizowana, nie poszukujemy przyczyny.

Każda z wymienionych faz badania diagnostycznego polega na wykonaniu określonego zestawu sprawdzeń i analizie uzyskanych wyników. Prowadzi to do stopniowego zmniejszania nieokreśloności stanu obiektów dzięki przyrostowi uzyskiwanej informacji. Złożoność badania diagnostycznego wynikająca ze złożoności urządzeń, powoduje konieczność opracowania zbioru sprawdzeń i określenia kolejności ich wykonywania. Ze zbioru sprawdzeń dostępnych można ułożyć wiele takich zbiorów sprawdzeń, których wykonanie zapewnia określenie stanu obiektu. Do realizacji sprawdzeń przy minimalnych nakładach istnieje konieczność poszukiwania optymalnych zestawów testów. Każdy taki uporządkowany zbiór nazywa się programem diagnostycznym.

Badanie stanu dowolnego obiektu technicznego można opisać wykorzystując następujące kategorie pojęciowe:

- model diagnostyczny obiektu,
- element obiektu,
- cecha obiektu i jego elementów,
- sprawdzenie, tor sprawdzeń i zbiory sprawdzeń,
- koszt realizacji sprawdzeń.

3.1.1 Modelowanie badań diagnostycznych

Modelem obiektu nazywa się uproszczony opis obiektu fizycznego odwzorowujący wybrane jego własności. Model diagnostyczny obiektu może być przedstawiony jako zbiór elementów funkcjonalnych $e_i = (i = 1,2,...,n)$ połączonych w sposób umożliwiający realizację zadanych funkcji obiektu.

$$E = \{e_i\} \; ; \; i = 1, \dots , n \tag{3.1}$$

Jako element e_i będzie rozumiana wyodrębniona część obiektu realizująca określoną wymaganiami funkcję cząstkową. Elementy mogą być bardziej lub mniej złożone w zależności od koniecznej dokładności rozróżniania. Tak więc pod pojęciem elementu można rozumieć zarówno pojedynczy element konstrukcyjny lub grupę takich elementów. Każdy z elementów tworzących obiekt posiada wyjścia i wejścia z występującymi na nich sygnałami. Dla uproszczenia przyjęto, że każdy z elementów obiektu posiada tylko jedno wyjście. Sygnał wyjściowy y_i elementu funkcjonalnego jest zależny od sygnału wejściowego i stanu elementu. Będzie więc charakteryzował stan wewnętrzny badanego elementu. Zbiór wszystkich cech elementów tworzących badany obiekt nazywa się cechami obiektu, charakteryzujący stan obiektu. Cecha jest odwzorowaniem stanu i jest dostępna dla badającego obiekt.

Dla obiektu badanego z punktu widzenia tematu rozprawy cecha elementu będzie przyjmować tylko dwie wartości, tzn. binarne 0 i 1. Jeżeli cecha elementu będzie równa 0 wtedy element obiektu nie spełnia wymagań – znajduje się w stanie niezdatności funkcjonalnej, w przeciwnym przypadku gdy cecha równa jest 1 element jest zdatny funkcjonalnie (element spełnia przewidziane dla niego funkcje). Stan elementu e_1 oznaczmy symbolem ε_1. Wówczas element e_1 obiektu jest w stanie zdatności funkcjonalnej ε_1^1 wtedy i

tylko wtedy gdy wartość jego cechy przyjmuje 1. Jeżeli wartość cechy ma wartość 0 element jest w stanie niezdatności ε_1^0.

$$(\varepsilon_1 = \varepsilon_1^1) \Leftrightarrow (y_i = 1) \tag{3.2}$$

$$(\varepsilon_1 = \varepsilon_1^0) \Leftrightarrow (y_i = 0) \tag{3.3}$$

Jeżeli wartość choćby jednej cechy przyjmuje wartość 0 to obiekt nie spełnia wymagań, funkcja nie jest realizowana czyli znajduje się w stanie niezdatności ε^0. Analogicznie jeżeli wszystkie cechy są równe 1 wtedy cały obiekt jest w stanie zdatności funkcjonalnej.

W celu określenia stanu obiektu niezbędne są pewne informacje, które można uzyskać drogą badania obiektu za pomocą sprawdzeń. Sprawdzenie jest ciągiem operacji służących badaniu cech badanego obiektu. Polega na przygotowaniu urządzeń do badania, podaniu odpowiednich sygnałów wejściowych w określonym stanie początkowym urządzeń, odczytaniu sygnału odpowiedzi i porównaniu go z wartościami oczekiwanymi. Sygnałem odpowiedzi będzie odpowiednie wysterowanie (lub nie) urządzeń wchodzących w skład konfiguracji funkcjonalnej. Zbiór wszystkich sprawdzeń D jakie można wykonać można przedstawić w postaci zbioru nazywanego zbiorem sprawdzeń dostępnych:

$$D = \{d_j\} \; ; \; j = 1, \ldots , m \tag{3.4}$$

Wynik sprawdzenia elementarnego d_j jest pozytywny, gdy wartość kontrolowanej cechy osiąga wartość 1. W przeciwnym razie mówi się o negatywnym wyniku sprawdzenia i wtedy wartość cechy osiąga 0.

Najczęściej za pomocą sprawdzenia d_j można skontrolować kilka lub kilkanaście algorytmów sterowania i kontroli poszczególnych elementów. Zbiór kontrolowanych algorytmów tworzących dane sprawdzenie d_j nazywa się torem sprawdzenia. Tor sprawdzenia w takim przypadku będzie kontrolował kilka funkcji badanego urządzenia.

Dla badanych urządzeń ze sprawdzeń dostępnych D można ułożyć wiele różnych uporządkowanych zestawów sprawdzeń różniących się wielkością i kombinacją oraz kolejnością realizacji. Uporządkowany zestaw sprawdzeń nazywa się programem diagnostycznym.

Realizując wszystkie dostępne sprawdzenia uzyskamy niezbędne informacje do określenia stanu zdatności funkcjonalnej badanych urządzeń. W sprawdzeniach dostępnych informacje o elementach będą się powtarzać tzn. że będą występować

sprawdzenia tzw. nadmiarowe które powtarzają już uzyskaną informację o poprawności badanego algorytmu. Aby uniknąć niepotrzebnego realizowania sprawdzeń nadmiarowych należy ze zbioru sprawdzeń dostępnych wyznaczyć zbiór sprawdzeń niezbędnych D_n, których realizacja dostarczy pełną informację o stanie funkcjonalnym urządzeń.

Problematyka kontroli stanu jest formalizowana w postaci tzw. zadań diagnostycznych. W wyniku rozwiązanego zadania uzyskuje się optymalny program badań D_{opt}, tzn. odpowiednio uporządkowaną sekwencję działań, pozwalającą określić stan techniczny badanego obiektu.

W przypadku badania obiektów mało złożonych wystarczy doświadczenie i intuicja odpowiednio wykwalifikowanego personelu i z reguły w ten sposób są realizowane badania. Natomiast w przypadku dużych obiektów konieczne jest wprowadzenie uogólnień i formalizacji zagadnień potrzebnych do opracowania optymalnego programu badań. Dla obiektów złożonych trudno jest opracować właściwy i pełny program badań jak to ma miejsce dla małych konfiguracji.

Badanie urządzeń srk szczególnie dla dużej konfiguracji jest czasochłonne oraz realizacja testów pociąga za sobą ograniczenia w dostępności badanych urządzeń. Często przed wykonaniem próby konieczne jest doprowadzanie urządzeń do określonego początkowego stanu, do którego konieczne jest zaangażowanie odpowiednich środków technicznych i zasobów ludzkich. Wynika stąd potrzeba poszukiwania optymalnych zestawów sprawdzeń (testów) niezbędnych do postawienia właściwej diagnozy, określenia kolejności czy rodzajów sprawdzeń, które zapewnią również minimalne koszty sprawdzeń. Z pomocą przychodzą metody optymalizacji, z wykorzystaniem których otrzymujemy programy niezbędne D_n. Kolejność realizowanych działań w procesie diagnozowania również ma wpływ na koszt badania. Zastosowanie dodatkowo kryteriów kosztowych uporządkuje dodatkowo program pod kątem chłonności (czasu, zasobów ludzkich, sprzętowych itp.) wykonania próby co również przełoży się na większą dostępność urządzeń do prowadzenia ruchu.

3.1.2 Metody organizacji procesów diagnostycznych

3.1.2.1 Metody optymalizacji, koszt sprawdzeń

Realizując proces sprawdzania zdatności funkcjonalnej obiektu wpływamy na dostępność systemu. Realizowanie poleceń wymuszonych testem powoduje, że badane elementy są przydzielone do realizacji zadania testowego. Elementy te nie mogą brać udziału w zadaniu - nastawianiu przebiegu, wynikającego z pracy posterunku. Ponadto jak wspomniano we wstępie badania funkcjonalne angażują znaczne środki osobowe, niekiedy sprzętowe a także są czasochłonne. Powstaje więc pytanie: jak można zminimalizować negatywne skutki realizacji badań diagnostycznych? Pomocne mogą być niektóre metody organizacji procesu diagnozowania [3].

- Metoda „dziecięca”

Najprostsza metodą, szczególnie przy braku informacji o wskaźnikach niezawodnościowych, która nie uwzględnia również czasu trwania testów oraz ich kosztów jest metoda dziecięca. Polega na sprawdzeniu każdego z *n* elementów struktury obiektu z osobna, przy czym kolejność sprawdzania jest obojętna. W najlepszym przypadku na niezdatny element trafimy już za pierwszym razem. W najgorszym przypadku przy stwierdzeniu sprawności *n-1* elementów teoretycznie nie ma potrzeby sprawdzania elementu ostatniego. Ostatni element musi być niezdatny.

Dla tej metody czas diagnozowania T_d będzie wynosił:

$$T_d = l \cdot t \tag{3.5}$$

w przypadku gdy niezdatny obiekt wykryjemy przy pierwszym sprawdzeniu, natomiast w przypadku gdy niezdatność stwierdzimy po realizacji przedostatniego testu czas diagnozowania wyniesie:

$$T_d = (n-l) \cdot t \tag{3.6}$$

gdzie:

n – ilość elementów w strukturze,

t – czas diagnozowania pojedynczego elementu.

- Metoda podziału połówkowego (wg liczby elementów)

Metoda ta polega na podziale na dwa podzbiory po możliwie zbliżonej ilości elementów każdy. Przy sprawdzaniu zdatności zastosujemy sprawdzenie, którego tor zawiera elementy z jednego zbioru podziału. Jeżeli wynik sprawdzenia jest pozytywny oznacza to, że elementy tego zbioru są zdatne oraz, że niezdatny jest element ze zbioru drugiego. W dalszych krokach postępujemy w identyczny dokonując podziału połówkowego zbioru drugiego, w którym znajduje się uszkodzony element. Analogiczną operację powtarzamy aż do wykrycia uszkodzonego elementu. Łatwo zauważyć, że czas diagnozowania obiektu z zastosowaniem metody podziału połówkowego będzie kilkukrotnie mniejszy niż przy metodzie dziecięcej szczególnie przy dużej ilości elementów.

- Metoda podziału połówkowego (wg sumy prawdopodobieństw)

Metoda jest możliwa do zastosowania jeżeli znane są wartości prawdopodobieństw niezdatności elementów. W zasadzie wartości te dla elementów praktycznie nigdy nie będą równe co najwyżej zbliżone więc metodologia podziału połówkowego wg liczby elementów nie jest adekwatna do zastosowania. Elementy obiektu należy podzielić na dwa zbiory w sposób aby sumy wartości prawdopodobieństw niezdatności elementów w zbiorze były zbliżone. Analogicznie postępujemy dzieląc kolejne, coraz mniejsze fragmenty obiektu.

- Metoda podziału połówkowego (wg najmniejszych kosztów kontroli)

W przypadku znajomości kosztów sprawdzeń można zastosować metodę podziału wg najmniejszych kosztów kontroli. Polega na podziale elementów podobnie jak metoda poprzednia ale podział realizowany jest według kosztu sprawdzeń. Sprawdzenia wykonywane są w kolejności najmniejszego kosztu.

Powyższe znane i stosowane metody optymalizacji procedur diagnozowania skupiają się wyłącznie na wyszukiwaniu uszkodzonego elementu a kryterium optymalizacji jest czas wykrycia lub koszt kontroli. Zakres testów funkcjonalnych nie obejmuje lokalizacji niezdatnego elementu, nie jest to cel tych testów.

Metody budowy testów pozwalają uzyskać najmniejszą, średnią liczbę sprawdzeń (najmniejszy czas realizacji sprawdzeń) doprowadzających do stwierdzenia zdatności obiektu.

Dla tego samego obiektu można wyznaczyć programy różniące się ilością i kolejnością. Istnieje więc konieczność optymalizacji programów dla wyboru korzystnego programu sprawdzeń wg określonego kryterium. Najczęściej stosowane kryteria:

- kosztu sprawdzeń,
- ilości sprawdzeń,
- ilości informacji,
- czasu trwania badania,
- prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzenia.

Metody z zastosowaniem ww. kryteriów są stosowanie w diagnozowaniu stanu urządzeń technicznych lecz ze względu na cel i założenia rozprawy omówione będą te związane z kryterium kosztowym i ilości informacji. Metody z zastosowaniem stricte wskaźników prawdopodobieństwa nie będą wykorzystywane w pracy. Uwzględniając:

- szeroką różnorodność urządzeń i realizowanych funkcji,
- różne strategie utrzymania i diagnostyki,
- uzyskanie rzeczywistych danych statystycznych i niezawodnościowych urządzeń od użytkownika,

autor stwierdził że będzie to powodować trudności w pozyskaniu właściwych wartości poszczególnych elementów systemu. Praca skupia się na testach funkcjonalnych a więc czy system realizuje zadane funkcje. Zdatność urządzeń badamy poprzez poprawne wykonanie polecenia. Można założyć, że prawdopodobieństwo utraty funkcji dla każdej z nich jest jednakowe niezależnie od urządzeń przy czym wartość prawdopodobieństwa jest nieistotna. Dla tych założeń oraz dość trudnym szacowaniem prawdopodobieństwa przyjęto, że metody wykorzystujące wskaźniki niezawodności nie będą wykorzystywane.

Istniejące inne metody to np.:

- metoda pełnego przejrzenia wszystkich programów,
- metoda wykorzystująca programowanie dynamiczne,
- metody uproszczone, np. metoda największego spadku.

Metoda pełnego przeglądu i programowania dynamicznego są metodami bardzo pracochłonnymi ale programy kontroli wyznaczone tymi metodami są za każdym razem

programem optymalnym. Z racji pracochłonności programy te są nieefektywne dla obiektów złożonych jakimi są systemy srk. Ponadto metody te opierają się na prawdopodobieństwie wykrycia uszkodzenia. W związku z tym zostanie omówiona metoda największego spadku. Metoda ta nie daje gwarancji znalezienia programu ściśle optymalnego, lecz jedynie programu mniej lub bardziej doń zbliżonego – program suboptymalny. Realizacja każdego sprawdzenia d_j dostarcza pewnej ilości informacji i jest równa ubytkowi entropii o stanie badanego obiektu przed i po realizacji sprawdzenia. Istotą tej metody jest to, że przy wyborze sprawdzeń niezbędnych do rozpoznania stanu obiektu kierujemy się ilością informacji dostarczonej przez każde sprawdzenie. Wybieramy zatem spośród wszystkich dostępnych sprawdzeń to, które powoduje największy przyrost informacji o obiekcie i wybrane ten sposób sprawdzenie będzie realizowane jako pierwsze d_1. Następnie dokonuje się znowu wyboru takiego sprawdzenia d_2 które posiada największy przyrost informacji (pomijając już sprawdzenie d_1). Analogicznie wybieramy kolejne sprawdzenia i otrzymujemy uporządkowany zbiór sprawdzeń niezbędnych.

$$D_n = \{ d_1, d_2, d_{(k)}, d_{(s)} \} \tag{3.7}$$

gdzie:

$d_{(k)}$ sprawdzenie wykonane jako k-te w kolejności,

$d_{(s)}$ sprawdzenie wykonane jako s-te w kolejności.

- Metoda przeglądu wszystkich kombinacji sprawdzeń

Warunkiem zastosowania tej metody jest znajomość czasu sprawdzania każdego modułu. Metoda polega na obliczeniu wartości oczekiwanej czasu diagnozowania dla każdej możliwej kolejności realizacji sprawdzeń. Wybiera się tę kombinację sprawdzeń dla której wyznaczono najkrótszy czas diagnozowania.

- Metoda skuteczności informacyjnej

Każde sprawdzenie wiąże się z określonym kosztem. Kosztem są użyte zasoby ludzkie, aparaturowe, akwizycja danych. Kosztem może również być czas badania. Występować będą więc sprawdzenia dostarczające dużą ilość informacji o badanym obiekcie ale koszt tych sprawdzeń angażuje również duże zasoby ludzkie i/albo aparaturowe. W takim przypadku wskazane jest optymalizować zbiór sprawdzeń pod kątem skuteczności informacyjnej.

$$\eta_j = \frac{I(k_j)}{c_j} \tag{3.8}$$

gdzie:

c_j – koszt (np. czas) realizacji sprawdzenia j-tego modułu.

Sprawdzenia zasadniczo realizowane są w kolejnościach malejących wartości wskaźnika skuteczności informacyjnej:

$$\eta_{j(1)} \geq \eta_{j(2)} \geq \eta_{j(n)} \tag{3.9}$$

Metoda pozwala wyznaczyć program diagnostyczny optymalizowany pod kątem kosztu realizacji ale nie gwarantuje uzyskania programu ściśle optymalnego. Wymaga obliczeń niekiedy skomplikowanych wynikających ze zmiany wskaźników skuteczności informacyjnej po uwzględnieniu poprzednich sprawdzeń.

3.1.2.2 Koszt sprawdzeń

Każde sprawdzenie obarczone jest konkretnym kosztem. W literaturze jest on poruszany i istotny z punktu minimalizacji ilości sprawdzeń jako jedno z kryterium optymalizacji. Na koszt sprawdzeń składa się:

- zaangażowanie odpowiedniej ilości osób do przeprowadzenia testów,
- zastosowanie urządzeń niezbędnych do przeprowadzenia próby (symulatorów) w celu ich obserwacji oraz wykonywaniu symulacji ruchu lub symulowanych usterek, lub zebrania wyników (rejestratory danych),
- zebranie danych i ich akwizycja.

Podczas badania urządzeń srk zależnie od celu badań konieczna jest obecność osób:

- na posterunku ruchu przy pulpicie nastawniczym wspierając i nadzorując prace dyżurnego ruchu oraz obserwując wskazania pulpitów nastawczych,
- w przekaźnikowni / komputerowni – pomieszczeniu gdzie znajdują się urządzenia zależnościowe w celu ich obserwacji oraz wykonywaniu symulacji ruchu lub symulowanych usterek,
- w terenie przy urządzeniach zewnętrznych, podobnie jak wyżej w celu ich obserwacji oraz wykonywaniu symulacji ruchu lub symulowanych usterek.

Istnieje grupa urządzeń i funkcji, które należy przebadać z wykorzystaniem rzeczywistego pociągu. Takimi urządzeniami są elementy systemu ETCS. Pomimo możliwości sprawdzenia poprawności wysyłania telegramów przez balisy za pomocą programatora balis konieczne jest sprawdzenie przez realizację jazdy pociągu wyposażonego w pokładowe urządzenia ETCS. Wymaga to zastosowanie pojazdu trakcyjnego z odpowiednimi urządzeniami pokładowymi wraz z obsługą. Testowana jest wtedy grupa urządzeń przytorowych oraz interakcja urządzeń przytorowych ETCS z urządzeniami pokładowymi.

Kosztem sprawdzeń można oznaczyć również koszt wynikający z przestoju urządzeń na czas przeprowadzania badań. W przypadku niektórych badań, konieczny jest demontaż poszczególnych podzespołów urządzenia do badań, szczególnie w badaniach ilościowych. Badane urządzenia nie są w tym czasie użytkowane oraz ograniczona jest ich dostępność.

Badania urządzeń sterowania ruchem kolejowym są skomplikowane do realizacji szczególnie, że przeprowadzane są na czynnych urządzeniach. Wyjątkiem są wstępne badania dopuszczające do eksploatacji gdzie próby urządzeń przeprowadzane są na poligonach i badane urządzenia pracują równolegle z istniejącymi urządzeniami srk. Pozostałe rodzaje badań wymagają wprowadzenia ograniczeń w prowadzeniu ruchu. Jeżeli badania skupiają się na jednym elemencie infrastruktury np. zwrotnica, ograniczenia dotykają tego elementu co powoduje brak możliwości realizacji zadań z wykorzystaniem badanego elementu np. nastawiania przebiegów przez ten rozjazd. Na czas przeprowadzenia prób obejmujących wiele elementów stosuje się zamknięcia torowe. Niezależnie czy badamy grupę elementów czy pojedynczo powoduje to istotne ograniczenia w dostępie do infrastruktury kolejowej. Może powodować to perturbacje w ruchu pociągów i wpływać na ich punktualność.

Reasumując, koszty mogą być:

- ilościowe (ilość zaangażowania personelu i sprzętu do przeprowadzenia testów),
- finansowe (np. wynajęcie lokomotywy, obsługi, personelu z kwalifikacjami),
- czasowe (czas trwania testów),
- dostępności urządzeń.

Uporządkowany zbiór sprawdzeń niezbędnych dodatkowo można zoptymalizować pod kątem kosztu sprawdzeń np. czasu wykonania testu. Na czas sprawdzenia może mieć wpływ

wynik sprawdzenia poprzedniego a dokładniej stan końcowy urządzeń powstały po skończeniu sprawdzenia. Stan końcowy jest zarazem stanem początkowym innego sprawdzenia. Nie będzie istniała potrzeba przygotowywania badanych urządzeń do testu czyli doprowadzania do właściwego stanu elementów. Wygenerowanie odpowiedniego stanu lub sytuacji ruchowej jest czaso- i zasobochłonne szczególnie dla dużej konfiguracji, gdzie konieczne jest przestawienie wielu zwrotnic lub wykazanie zajętości na szlaku na n-tym odstępie. Ponadto należy zwrócić uwagę, że grupa testów – próby eksploatacyjne [2] jest realizowana podczas gdy urządzenia są podstawą prowadzenia ruchu i realizacja tych prób wiąże się z ograniczeniem dostępności urządzeń do prowadzenia ruchu. Aby skrócić czas prób zasadne jest zmniejszenie czasu ich trwania bez ograniczania niezbędnej ilości prób (realizacja zbioru D_n).

Czas realizacji sprawdzenia C_d jest to czas przygotowania do próby c_{sp} oraz czas trwania próby c_{tp}:

$$C_d = c_{sp} + c_{tp} \tag{3.10}$$

gdzie:

c_{sp} – czas przygotowania stanu początkowego urządzeń do próby,

c_{tp} – czas trwania próby.

Układając tak kolejność prób ze zbioru sprawdzeń poszukujemy sekwencji aby stan końcowy *sk* po sprawdzeniu d_j był stanem początkowym *sp* sprawdzenia d_k. Pomniejszamy w ten sposób czas sprawdzenia d_k o czas c_{sp} przygotowania do próby *sp*.

$$\text{gdy: } sk_{dj} = sp_{dk} \quad \text{wtedy: } C_{dk} = c_{tp} \tag{3.11}$$

W przypadku braku znalezienia kolejnej próby o określanym stanie początkowym wybiera się niezrealizowane sprawdzenie o największej ilości dostarczanej informacji.

Uzyskamy wtedy program prób zoptymalizowany pod kątem czasu trwania prób:

$$D_{opt} = \{ d_1, d_2, d_{(k)}, d_{(s)} \} \tag{3.12}$$

gdzie:

$d_{(k)}$ sprawdzenie wykonane jako k-te w kolejności,

$d_{(s)}$ sprawdzenie wykonane jako s-te w kolejności.

Niezależnie od przedstawionego autorskiego przykładu, każdy zbiór testów zasadnie jest zoptymalizować pod kątem przyjętego kryterium. Tak wygenerowany program testów musi być zrealizowany dokładnie po kolei. Jest to jednak niemożliwe ze względu na wiele nieprzewidywanych zdarzeń, błędnych, nietypowych zadziałań badanego systemu, ruchu pociągów nierozkładowych itp. Wskazane jest zatem wygenerowanie grupy testów dostępnych spośród których wybieramy zbiór testów charakteryzujący się najmniejszym kosztem.

3.2 Badania diagnostyczne systemów sterowania ruchem kolejowym

Testy funkcjonalne dają ocenę o poprawności działania urządzeń, odpowiadają one na pytanie czy system wykonuje określone funkcje zgodnie z założeniami. Badania funkcjonalne przeprowadzane są m.in. podczas procesu certyfikacji urządzeń i są one źródłem informacji na podstawie których można określić zgodność z wymaganiami określonymi we właściwych, dla danego typu urządzeń, specyfikacjach technicznych i dokumentach normalizacyjnych.

Proces eksploatacji urządzeń srk przewiduje również sprawdzanie poprawności działania, które powinno być wykonywane:

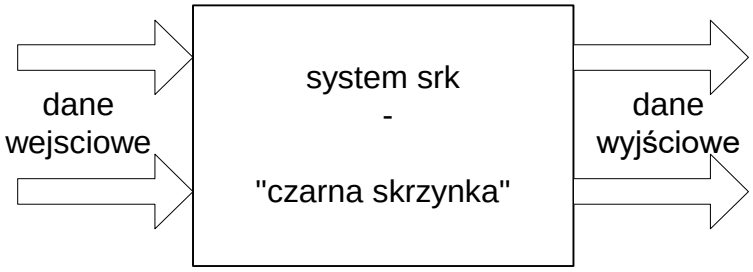
- na etapie certyfikacji urządzeń,
- podczas eksploatacji:
  - cyklicznie w stałych odstępach czasu zgodnie z instrukcjami utrzymania,
  - po stwierdzeniu zakłóceń w działaniu urządzeń,
  - po usunięciu usterek wymagających napraw, wymiany uszkodzonych elementów i regulacji,
  - po wypadkach kolejowych w ramach postępowania komisji ds. wypadków kolejowych,
  - przy odbiorze urządzeń:
    - czasowo wyłączonych z eksploatacji,
    - przy przekazywaniu do eksploatacji.

3.2.1 Metodyka badań funkcjonalnych stacyjnych systemów srk

Testy funkcjonalne i bezpieczeństwa zasadniczo zaliczane są do metody czarnej skrzynki i przeprowadza się je realizując wcześniej przygotowany plan testów. Badany system srk jest

traktowany jako „czarna skrzynka”, którego zachowanie można ustalić na podstawie wprowadzonych danych wejściowych (poleceniach, stanach elementów) i związanych z nimi danych wyjściowych – reakcji na wprowadzane wymuszenia. Zespół testujący, realizujący program badań, czy zespół budujący zestawy testów na podstawie postawionych wymagań i założeń funkcjonalnych, nie muszą znać dokładnej wewnętrznej struktury badanego urządzenia a jedynie ich ogólną budowę i zasadę współpracy poszczególnych komponentów systemu. Podczas przygotowywania testów niekiedy dopuszczalny a nawet konieczny jest wgląd w wewnętrzną strukturę badanych urządzeń tzw. metoda szarej skrzynki. Pozwala to na precyzyjne wygenerowanie odpowiednich przypadków testowych co jest przydatne w testach urządzeń o skomplikowanej strukturze a szczególnie w testach bezpiecznościowych. Tak wygenerowany program testów realizuje się już na poziomie metody czarnej skrzynki.

Metodę testów można przedstawić za pomocą modelu zaprezentowanego na rysunku. 3.1.



Rys. 3.1 Model testowania systemów srk metodą czarnej skrzynki

Przydatną cechą testowania, gdzie urządzenia są traktowane jako czarna skrzynka, jest powtarzalność oraz możliwość wielokrotnego wykorzystania wyników.

Jako zbiór danych wejściowych będą rozumiane:

- polecenia (nastawcze) wydawane przez operatora,
- sygnały z otoczenia systemu,
- informacje o stanie urządzeń zewnętrznych i otoczenia systemu.

System srk niezależnie od struktury, typu urządzeń i realizowanych funkcji traktowany jest jako czarna skrzynka, którego zachowanie można ustalić jedynie na podstawie zbioru danych wejściowych i związanych z nimi danych wyjściowych.

Dane wejściowe w zależności od przeprowadzanych testów (funkcjonalne, bezpiecznościowe) są podzielone na dwie grupy. Jedna grupa stanowi zbiór danych prawidłowych, drugą zbiór danych nieprawidłowych. Zbiorem danych prawidłowych będą np. polecenia wydawane z pulpitu dyżurnego ruchu dostępne w aktualnej sytuacji ruchowej gdy spełnione są warunki do realizacji danej funkcji. Dane nieprawidłowe są to wymuszone polecenia w nieadekwatnym stanie urządzeń czy symulowane usterki mogące spowodować niezgodne ze specyfikacją zachowanie systemu.

Jako dane wyjściowe – reakcja urządzeń srk na wprowadzone dane wejściowe – będą rozumiane:

- sygnały wyjściowe z systemu sterujące urządzeniami zewnętrznymi,
- zobrazowanie stanu urządzeń,
- komunikaty diagnostyczne.

Uzyskane dane podlegają ocenie – czy dla określonych wprowadzonych danych wejściowych (generowanych zdarzeniach) otrzymano zgodne ze specyfikacją dane wyjściowe, bądź czy reakcja systemu była właściwa. Oczekiwany wynik testu, reakcja systemu, opisana jest w specyfikacji testów.

Kompletna specyfikacja testów urządzeń srk powinna zawierać pełne pokrycie przypadkami testowymi każdej realizowanej przez system funkcji, przy czym funkcja czy zmiana stanu urządzenia zostanie przetestowana co najmniej raz. Tylko takie podejście zagwarantuje prawidłowe i poprawne zweryfikowanie zgodności badanej struktury z określonymi wymaganiami. Podczas generowania testów konieczne jest określenie jaki będzie ich cel i zakres oraz powinny zostać wymienione wszystkie funkcje i przypadki jakie będą testowane.

Prawidłowy test określonej funkcji powinien zawierać: założenia dla poprawnego wykonania testów, informacje ogólne, kroki i warunki wykonania testu, informacje dotyczące oczekiwanego i otrzymanego wyniku wraz z komentarzem.

Założenia powinny zawierać informacje co jest niezbędne dla przeprowadzenia testów. Powinna być wyspecyfikowana konfiguracja sprzętowa jaka będzie badana, wraz z otoczeniem systemowym badanej struktury i systemami współpracującymi, warunki środowiskowe. W przypadku gdy pewne elementy np. zewnętrzne urządzenia nie są

przedmiotem badań, a są niezbędne z punktu widzenia działania systemu, mogą one zostać zasymulowane; należy jednak przedstawić uzasadnienie braku negatywnego wpływu symulacji na wynik testu.

Informacje ogólne przypadku testowego służą do identyfikacji badanego elementu lub realizowanej funkcji i zawierają:

- cel testu / grupy testów,
- opis testowanego elementu czy funkcji,
- unikalny identyfikator.

Kroki i warunki wykonania testu są niezbędne w celu poprawnego wykonania próby, szczególnie składającej się z sekwencji działań czy poleceń w określonej kolejności:

- stan początkowy (stan urządzeń) przed testem,
- próba lub jej kroki podzielone na akcje (wykonanie pojedynczej czynności) oraz na odpowiedzi (reakcje systemu). Ciągi akcji mogą być poleceniami lub generowanymi usterkami przez operatora, stanami urządzeń sterowanych.

Informacje wynikowe:

- oczekiwany wynik testu,
- rzeczywisty wynik testu (uzupełniany przez testera).

Za prawidłowo wykonany test uważać można tylko taki, który został przeprowadzony zgodnie z opisem i uzupełniony wynikiem rzeczywistego wykonania próby a jeżeli zachodzi potrzeba stosownym komentarzem.

Ze względu na funkcje realizowane przez urządzenia sterowania ruchem pełna specyfikacja testów jest dokumentem obszernym. Z tego względu przypadki testowe powinny być pogrupowane pod kątem badanych elementów (np. napęd, sygnalizator, układ kontroli niezajętości) czy funkcji, wraz z rozdzieleniem na test w warunkach normalnych i test w warunkach uszkodzeń.

Program testów może zawierać testy funkcjonalne i testy bezpiecznościowe, przy czym w testach bezpiecznościowych można wyróżnić:

– testy polegające na sprawdzeniu reakcji systemu na niewłaściwe dane wejściowe (polecenia, zasymulowane nieprawidłowe stany urządzeń) – bezpieczeństwo funkcjonalne,
– testy polegające na sprawdzeniu wykrywania przez system stanów usterkowych (sieci kablowej, elementów peryferyjnych/sterowanych), i ewentualnego przejścia systemu do stanu bezpiecznego – bezpieczeństwo techniczne.

W zależności od celu testów można je podzielić na testy kompleksowe czyli do określenia działania systemu jako całości lub na testy określonej funkcji realizowanej przez system. Podstawową techniką tworzenia programu testów jest analiza funkcjonalna, to znaczy definiowanie testów w oparciu o istniejącą specyfikację i wymagania. Zbiór funkcji i zasad ich realizacji powinien być ściśle określony w specyfikacji wymagań dla każdej klasy systemów. Specyfikacja ta powinna zawierać:

– wymagania niezwiązane z bezpieczeństwem,
– wymagania związane z bezpieczeństwem technicznym – integralnością bezpieczeństwa,
– wymagania związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym.

Dla urządzeń srk wymagania powinny zostać określone przez przyszłego użytkownika. Z reguły taka specyfikacja wymagań istnieje i chociaż jest rozproszona w wielu dokumentach jak rozporządzenia, normatywy, wymagania zarządcy infrastruktury, specyfikacje, zakładamy że jest poprawna, oraz że można na jej podstawie opracować pełne testy.

3.2.2 Badania urządzeń srk w procesie certyfikacji

Zastosowanie urządzenia do sterowania ruchem kolejowym na polskiej sieci kolejowej wiąże się z jego dopuszczeniem do eksploatacji. Jednym z istotnych warunków dopuszczenia do eksploatacji urządzenia mającego wpływ na bezpieczeństwo ruchu jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu. Wykaz urządzeń dla których wymagane jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji zawarty jest w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju [74]. Dokument wyróżnia przy tym kategorie sieci kolejowych, na których urządzenie ma być stosowane, przynależność do podsystemu sterowania oraz wymagania zawarte w TSI. Świadectwo wydawane jest na czas nieokreślony. W przypadku nowego typu urządzenia lub konieczności wykonania prób eksploatacyjnych, świadectwo

wydawane jest na czas określony potrzebny na wykonanie badań technicznych przez uprawniony podmiot. Badania techniczne [74] przeprowadza jednostka organizacyjna, posiadająca uprawnienia do przeprowadzania badań i wydawania certyfikatów.

Podczas certyfikacji przeprowadzane są różne rodzaje prób i badań urządzeń i są one niezbędnym elementem w procesie dopuszczania. Otrzymane wyniki są źródłem informacji, na podstawie których można określić zgodność z wymaganiami określonymi we właściwych, dla danego typu urządzeń, specyfikacjach technicznych i dokumentach normalizacyjnych. Badania te przeprowadzane są na różnych etapach procesu certyfikacji. Uzyskanie świadectwa terminowego poprzedza się badaniami laboratoryjnymi. Następnie urządzenia badane są w terenie w warunkach rzeczywistego ich zastosowania i przeznaczenia. Po pozytywnych testach urządzenia otrzymują świadectwo bezterminowe.

Zasadniczymi dokumentami bezpośrednio odnoszącymi się do dopuszczenia urządzenia do eksploatacji jest Rozporządzenie [74] oraz instrukcja wewnętrzna zarządcy infrastruktury PKP Polskie Linie Kolejowe [70]. W dokumentach tych pojawiają się następujące rodzaje badań:

- badania techniczne,
- próby eksploatacyjne,
- badania terenowe.

Badania na podstawie których określa się zgodność urządzenia z wymaganiami i działania systemu w różnych warunkach, w rozumieniu Rozporządzenia [74] nazywa się badaniami technicznymi. Zakres badań technicznych koniecznych do wydania świadectwa jest określony w rozdziale 4 Rozporządzenia i obejmuje:

- badanie zgodności z wymaganiami określonymi we właściwych, dla danego typu urządzeń, specyfikacjach technicznych i dokumentach normalizacyjnych,
- analizę wyników prób eksploatacyjnych,
- badanie interfejsów z przewidzianymi do zabudowy urządzeniami powiązanymi, dla których wymagane jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji.

Ponadto dla określonych typów urządzeń wymienionych w Rozporządzeniu [74] dodatkowo należy przeprowadzić badania:

- funkcjonalne w warunkach normalnych,

- funkcjonalne w warunkach oddziaływania uszkodzeń wraz z oceną zdolności pozostawania w stanie bezpiecznym, przy zmiennych wartościach parametrów napięcia, prądu i częstotliwości,
- funkcjonalne w warunkach oddziaływania czynników zewnętrznych:
    - klimatyczne,
    - na oddziaływania mechaniczne,
    - na oddziaływania elektryczne, w tym kompatybilności elektromagnetycznej,
    - ocenę zabezpieczenia przed nieautoryzowanym dostępem,
    - wytrzymałościowe.

Wyżej wymienione badania dla wczesnej fazy cyklu życia urządzenia przeprowadzane są w laboratoriach w celu potwierdzenia zgodności z założeniami i wymaganiami, na podstawie których jednostka opracowuje wstępną opinię.

Potwierdzeniem wyników badan laboratoryjnych jak również działania systemu są próby eksploatacyjne i badania terenowe. Przeprowadzane są one na poligonie badawczym w warunkach identycznych do warunków normalnej pracy. Badania terenowe określone w instrukcji [70] przeprowadza w warunkach gdy badane urządzenia nie są podstawą prowadzenia ruchu i nie odpowiadają za bezpieczeństwo. Pracują w tle, równolegle z istniejącymi.

Kontrolowana jest praca urządzenia w rzeczywistych warunkach terenowych przed przekazaniem ich do rzeczywistej eksploatacji, poprawność instalacji urządzenia oraz rozwiązań aplikacji specyficznej. Po pozytywnych wynikach badań urządzenia przekazuje się do eksploatacji gdzie są podstawą prowadzenia ruchu kolejowego i przedmiotem prób eksploatacyjnych.

Próby eksploatacyjne określone w dokumentach [74], [70] przeprowadza się zgodnie z zatwierdzonym programem prób, który opracowywany jest przez uprawnioną jednostkę. Z punktu widzenia przeprowadzania badań program poza treściami formalnymi, powinien zawierać ich plan wraz z warunkami przeprowadzania, określać przebieg a niekiedy kolejność. W przypadku prób wymagających określonego stanu początkowego urządzeń lub określonej sytuacji ruchowej konieczne jest uwzględnienie w programie szczegółowego przebiegu próby.

Podczas trwania prób dokonuje się również sprawdzeń okresowych w celu sprawdzenia czy urządzenie zachowuje parametry i spełnia wymagania oraz przeprowadza się próby:

- funkcjonalne, w celu sprawdzenia poprawności działania,
- niezawodności w celu oceny parametrów niezawodności, gotowości i podatności utrzymaniowej.

W Rozporządzeniu [74] wyróżnione są również interfejsy, dla których też należy przeprowadzić badania. Zapis ten zdaniem Autora jest niejednoznaczny. Nie precyzuje dokładnie jakie interfejsy obejmuje oraz wiązane interfejsem urządzenia. Umożliwia to powiązanie urządzeń bez przebadania prawidłowości rozwiązania. Interfejs może komunikować:

- urządzenie dla którego wymagane jest świadectwo z urządzeniem dla którego nie jest wymagane,
- urządzenia dla których nie są wymagane świadectwa,
- urządzenia dla których są wymagane świadectwa.

W związku z powyższym istnieje zagrożenie powiązania z urządzeniami mającymi wpływ na bezpieczeństwo ruchu kolejowego w niebezpieczny sposób. Niepoprawnie zaprojektowany układ powiązania, oddziaływanie urządzenia (emisja zakłóceń) lub usterka może powodować niepoprawne zadziałanie urządzeń srk i potencjalne doporowadzenie do sytuacji niebezpiecznej. Konieczne zatem staje się przebadanie wszystkich rodzajów powiązań, w których występują urządzenia dla których wymagane są świadectwa. Badania takie powinny uwzględniać zarówno działanie interfejsu w warunkach normalnej pracy oraz oddziaływania fizycznych uszkodzeń w postaci przerw żył, zwarć pomiędzy żyłami kabla transmisyjnego i uszkodzenia zastosowanych elementów dodatkowych – np. przekaźników, ochronników. Próby te potwierdzą poprawność rozwiązania interfejsu jak również będą potwierdzeniem poprawności założeń i przeprowadzonych analiz bezpieczeństwa.

Wszystkie z wymienionych badań i prób polegają na wykonaniu określonego zestawu sprawdzeń i analizie uzyskanych wyników. Na ich podstawie sporządzane są raporty z badań i testów oraz opinie oraz certyfikaty niezbędne do wydania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji.

3.2.3 Odbiory techniczne urządzeń srk

Celem odbioru technicznego urządzeń srk jest sprawdzenie czy nowo zabudowane lub przebudowane spełniają wymagania techniczne i inne wymagania określone w dokumentach na podstawie których powinny być wykonane roboty. Odbioru technicznego dokonuje się na podstawie przedłożonych dokumentów technicznych badań i pomiarów oraz wyników sprawdzeń funkcjonalnych. Postanowienia zawarte w wytycznych [63] określają dla poszczególnych typów urządzeń zakres prób technicznych i sprawdzeń, które należy przeprowadzić w ramach odbioru. Próby te powinien przeprowadzić wykonawca i komisja odbioru technicznego a ich zakres i warunki przeprowadzania są zbieżne z próbami wykonywanymi w procesie certyfikacji urządzeń. Dla urządzeń ETCS wygenerowane są scenariusze operacyjne, opublikowane przez Europejską Agencję kolejową oraz krajowego regulatora Urząd Transportu Kolejowego. Są to schematy, w których opisane są poszczególne kroki działania systemu stanowiące zbiór zasad jego funkcjonowania i jednocześnie stanowią narzędzie do weryfikacji poprawności działania systemu ETCS.

3.2.4 Okresowe diagnozowanie urządzeń srk

Przepisy wewnętrzne w formie instrukcji i wytycznych zarządcy infrastruktury (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.) określają działania dotyczące eksploatacji i diagnostyki. Są to m.in. instrukcje Ie-5, Ie-7, Ie-12) [62][64][65]. Ogólne zasady eksploatacji urządzeń i postępowania w czasie prowadzenia zabiegów obsługi technicznej, diagnostycznej i robót w urządzeniach opisane są w instrukcji Ie-5. Instrukcja Ie-7 dotyczy realizacji działań diagnostycznych i kontroli okresowych, opisuje proces diagnostyczny i zakresy badań w ramach utrzymania obiektów we właściwym stanie technicznym. Natomiast instrukcja Ie-12 szczegółowo opisuje zasady i metody realizacji poszczególnych prac obsługowych i napraw poszczególnych typów urządzeń srk. Poza tymi instrukcjami obowiązują wytyczne odbioru technicznego oraz przekazywania do eksploatacji urządzeń srk (Ie-6). Określają one warunki, zasady i tryb dokonywania odbioru technicznego i przekazywania do eksploatacji urządzeń nowych oraz po remontach, przebudowie i modernizacji. Urządzenia się zużywają, zmieniają się warunki zabudowy w jakich one pracują jak zmiana układu torowego lub warunki ruchowe pracy stacji do których należy dostosować istniejące urządzenia lub wybudować nowe. Na modernizowanych stacjach zgodnie z wymaganiami instaluje się urządzenia

komputerowe dla których należy zapewnić współpracę z systemami na przylegających szlakach i sąsiednich posterunkach za pomocą odpowiednich interfejsów [9]. Dla takich urządzeń i ich interfejsów powiązania również przeprowadza się odpowiednie badania na podstawie których potwierdza się ich poprawność działania i spełnienie odpowiednich wymagań technicznych.

W przedstawionych dokumentach opisane są m.in. działania, na podstawie których można dokonać diagnozy oceny stanu technicznego urządzenia – określenia zbioru właściwości technicznych na podstawie realizacji badań tj. pomiarów, testów, kontroli i prób funkcjonalnych. Sprawdzenia funkcjonalne wchodzą również w zakres działań dotyczących konserwacji i przeglądów urządzeń.

3.2.5 Badania powypadkowe

Innym przypadkiem badań funkcjonalnych są badania urządzeń po wypadkach kolejowych. Badania przeprowadzane są przez komisję powypadkową, która na podstawie okoliczności wypadku określa urządzenia lub podzespoły urządzenia jakie należy poddać sprawdzeniom oraz ustala szczegółowy program sprawdzeń oraz metody. Informacje o stanie urządzeń otrzymywane są na postawie zestawu pytań zawartych w wytycznych badania urządzeń po wypadku kolejowym (Ie-15) [69]. Zbiór pytań może zostać rozszerzony jeżeli podstawowy zestaw nie pozwala na określenie stanu urządzeń. W celu opracowania odpowiedzi na postawione pytania, komisja wykonuje próby, badania i sprawdzenia własne lub wspólnie z producentem urządzeń.

3.2.6 Warunki bezpiecznego stosowania

Zakres badań funkcjonalnych określa również producent w warunkach bezpiecznego zastosowania urządzenia (SRAC Safety-Related Application Conditions), szczególnie w przypadku gdy poszczególne funkcje nie są wykorzystywane w zdefiniowanym w warunkach okresie czasu. Pomimo istnienia rozbudowanej wewnętrznej diagnostyki, szczególnie w urządzeniach komputerowych, nie jest możliwe wykrycie wszystkich potencjalnych uszkodzeń. Do przeprowadzenia niektórych testów urządzenia i wymagana jest zmiana stanu badanego obiektu. Efektem testów przeprowadzanych okresowo jest sprawdzenie

poprawności działania poprzez przeprowadzenie integralnych testów diagnostycznych systemu.

3.3 Monitorowanie funkcjonowania urządzeń

3.3.1 Model realizacji funkcji przez system srk

Na podstawie analizy właściwości funkcjonalnych i diagnostycznych systemu srk można stwierdzić, że system srk jest podatny diagnostycznie czyli można przeprowadzić sprawdzenia pozwalające na stwierdzenie zdatności funkcjonalnej. Zdatność funkcjonalna oznacza realizację funkcji przez system zgodnie z przeznaczeniem i założeniami określonymi w dokumentacji techniczno-ruchowej, wymaganiach oraz dokumentach normatywnych.

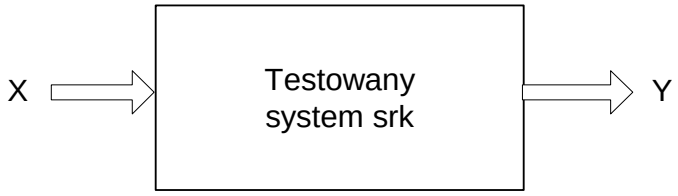
Realizacja określonej funkcji przez system polega na przekształceniu zbioru napływających danych wejściowych X

$$X = \{ x_k \} \quad k = 1, \dots , n \tag{3.13}$$

w zbiór danych wyjściowych Y

$$Y = \{ y_k \} \quad k = 1, \dots , n \tag{3.14}$$

Model przekształcania funkcji przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2 Model realizacji funkcji przez system srk

Każde napływające zadanie w postaci zbioru X w procesie sterowania ruchem kolejowym jest realizowane w systemie według określonej procedury. Polega ona na sprawdzeniu stanu/statusu elementu, wybraniu, zarezerwowaniu i przydzieleniu elementu do konfiguracji funkcjonalnej realizującej zadanie. Zbiór procedur tworzy zbiór algorytmów sterowania A,

$$A = \{ a_k \} \quad k = 1, \dots , n \tag{3.15}$$

a każdy algorytm jednostkowy a_k realizowany jest przez konkretną określoną konfigurację funkcjonalną.

Wynikiem działania każdego algorytmu jest przekształcenie określonych zbiorów wielkości więc kontroli podlegać będzie uporządkowana trójka,

$$\langle X, A, Y \rangle \tag{3.16}$$

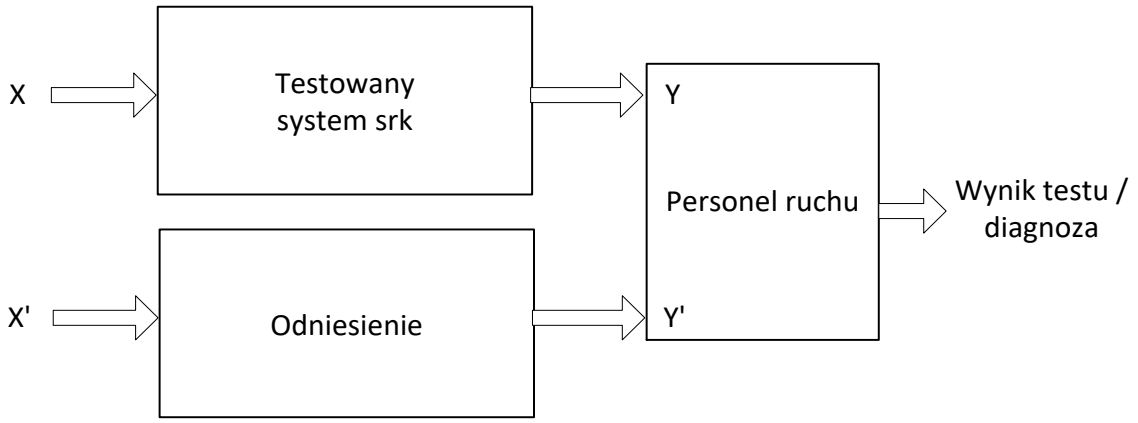
której relacje można zapisać za pomocą iloczynu kartezjańskiego

$$R = X \times A \times Y \tag{3.17}$$

Poprawność realizacji pojedynczego zadania przez poszczególną konfigurację wykonuje się poprzez kontrolę poprawności przekształcenia x_k w y_k przez system realizujący algorytm a_k.

$$r = x_k \times a_k \times y_k \tag{3.18}$$

Sprawdzenie poprawności funkcjonowania jest realizowane na podstawie porównania zbiorów X i Y z wartościami wzorcowymi X' i Y'. Nastawiany przebieg wynikający z realizacji procesu ruchowego stacji jest jednym z testów dostępnych ze zbioru testów. Realizacja tego zadania w innej konfiguracji funkcjonalnej z punktu widzenia realizacji zbioru dostępnych testów jest innym (kolejnym) przypadkiem testowym. Model kontroli funkcjonowania systemu srk przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.3 Kontrola funkcjonowania systemu srk

3.3.2 Monitorowanie realizacji zadania

Kontrola funkcjonowania realizowana w trakcie eksploatacji bazuje na sprawdzeniu poprawności realizacji określonych zadań przez system. Określony zbiór zadań (przebiegów i poleceń nastawczych) może być realizowany podczas normalnego użytkowania systemu bez jego wyłączania z eksploatacji i ograniczania dostępności. Dane wejściowe napływające do systemu występują w postaci zbiorów:

- poleceń nastawczych (nastawienia przebiegu, przełożenia zwrotnicy),
- informacji z urządzeń przytorowych o ich stanie i predyspozycji do realizacji polecenia,
- informacji o sytuacji ruchowej w obszarze sterowania i zbliżających się do jego granic,
- rozkładu jazdy i regulaminu pracy stacji.

Są to naturalne sygnały, na podstawie których, system realizuje zadania. Dane te będące integralną częścią struktury technicznej podlegają przetworzeniu przez system srk na podstawie określonych algorytmów sterowania i generowane są dane wyjściowe. Danymi wyjściowymi przy zdatnym funkcjonalnie systemie jest realizacja polecenia np. nastawienie przebiegu poprzez wysterowanie odpowiednich urządzeń, przestawienie zwrotnicy, poprawne wygenerowanie telegramu przez LEU, transmisja danych z balis czy poprawne odwzorowanie sytuacji ruchowej na monitorach itp.

Podczas realizacji procesu sterowania ruchem wszelkie nieprawidłowości w działaniu urządzeń mogą zostać dostrzeżone przez dyżurnego ruchu lub wykryte przez wewnętrzną diagnostykę systemu i wyświetlone w postaci komunikatów diagnostycznych, ponieważ na każdym etapie wykonywane są:

- monitorowanie systemu poprzez analizy informacji o predyspozycjach systemu do określonego zadania (faza oczekiwania na zadanie),
- kontrola dostępności i doprowadzenie elementów konfiguracji do wymaganego stanu funkcjonalnego oraz przydzielenie ich do zadania (etap przygotowania i nastawiania drogi),
- kontrola przejazdu pociągu po drodze przebiegu i zwolnienie elementów konfiguracji (etap dozorowania jazdy pociągu).

Ponadto określenie stanu dostępności systemu opracowywane jest na podstawie analizy relacji adekwatnych dla każdego etapu procesu sterowania ruchem i tak:

- dla fazy oczekiwania na zadanie – monitorowania:

$$R_m = X_m \times A_m \times Y_m \tag{3.19}$$

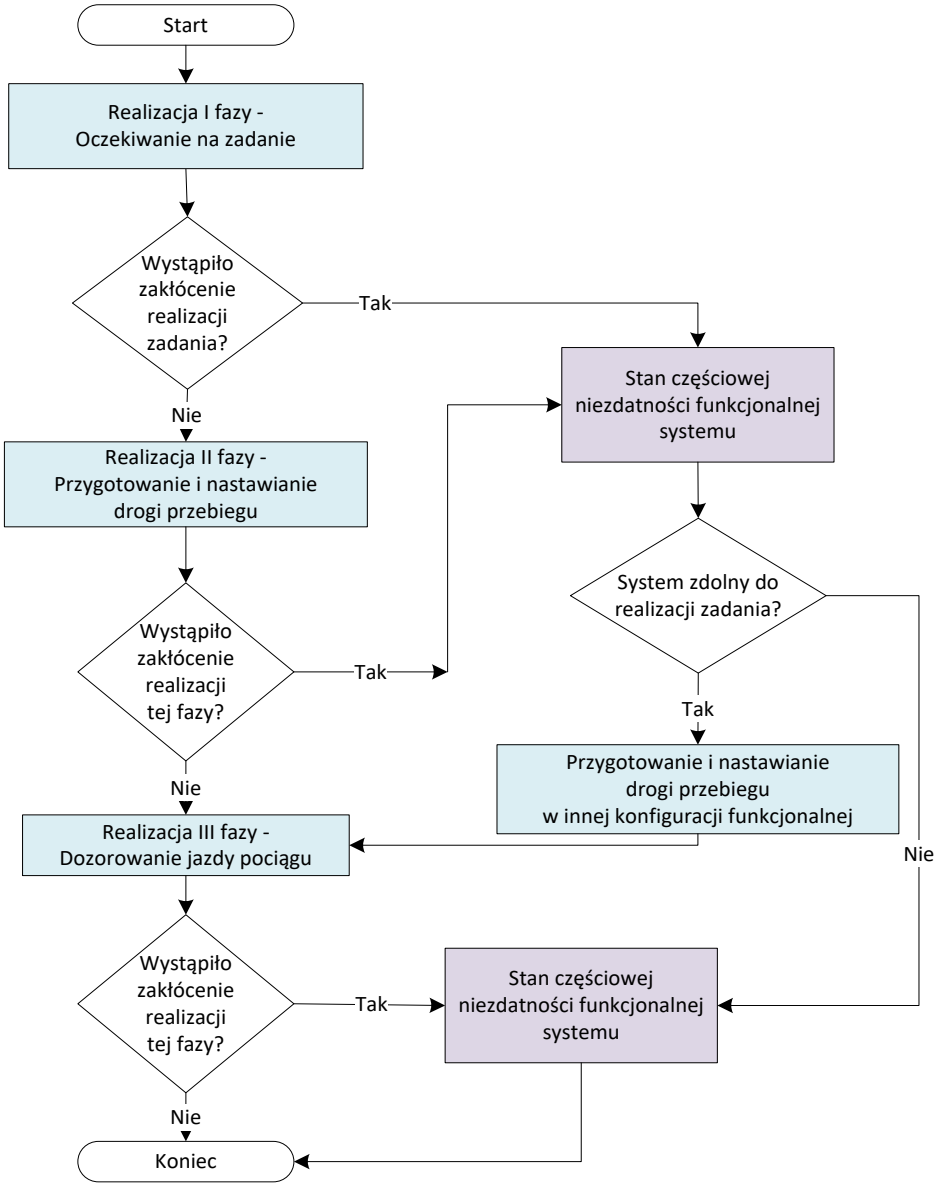
– dla fazy nastawiania przebiegu:

$$R_n = X_n \text{ x } A_n \text{ x } Y_n \tag{3.20}$$

– dla fazy dozorowania jazdy pociągu:

$$R_d = X_d \text{ x } A_d \text{ x } Y_d \tag{3.21}$$

Monitorowanie systemu podczas realizacji zadania w ograniczonym stopniu określa stan systemu i jego dostępność do realizacji wszystkich zadań. Proces monitorowania systemu podczas realizacji zadania można przedstawić w postaci algorytmu przedstawionego na rysunku 3.4.



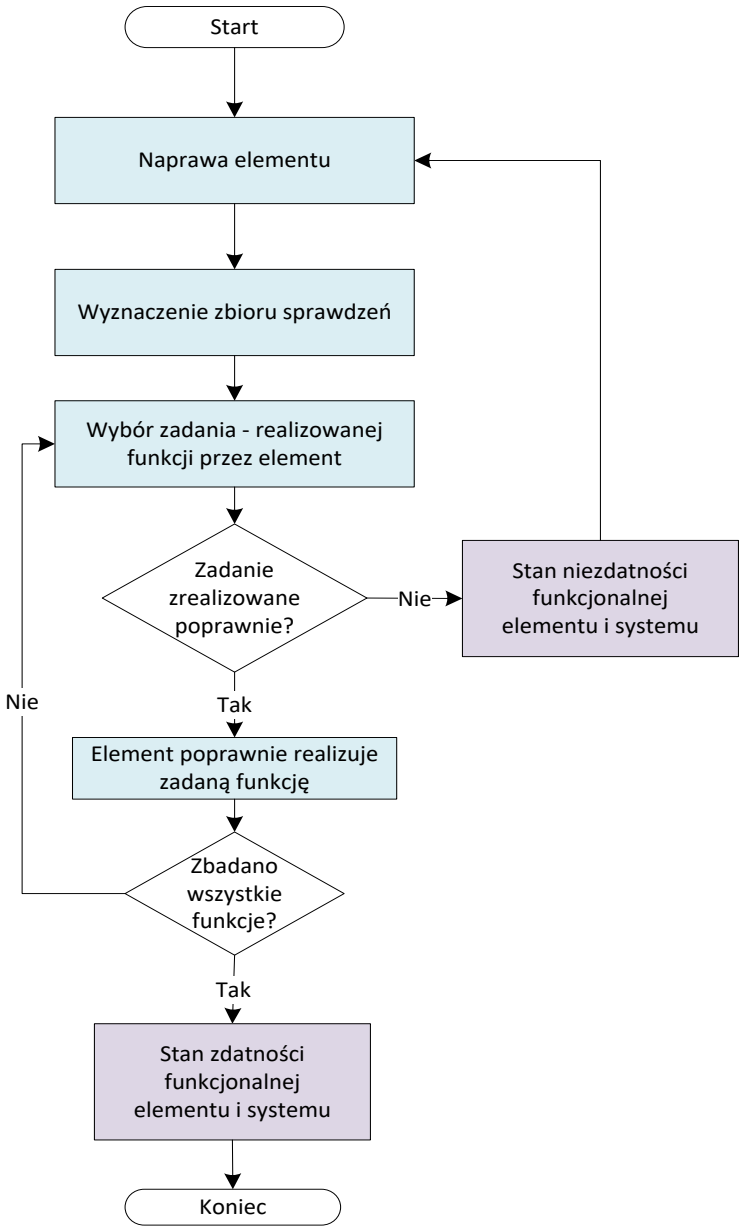
Rys. 3.4 Monitorowanie systemu podczas realizacji zadania przez urządzenia stacyjne

3.4 Kontrola funkcjonowania urządzeń

3.4.1 Kontrola funkcjonowania podczas badania urządzenia po naprawie

Algorytm kontroli funkcjonowania urządzenia po naprawie lub po stwierdzonych zakłóceniach w działaniu polega na określeniu czy badane urządzenie jest zdatne czy niezdatne funkcjonalnie. Dane wejściowe będą identyczne jak dla przypadku kontroli funkcjonowania podczas realizacji algorytmu zadania. Przywrócenie do stanu zdatności polega na naprawie uszkodzonego komponentu lub jego wymianie na zdatny. Następnie w celu kontroli zdatności urządzeń oraz poprawności wykonania naprawy należy przeprowadzić testy naprawianego komponentu. Ich sprawdzenia można ograniczyć wyłącznie do zadań w których dany komponent bierze udział. W ten sposób naturalnie ogranicza się zbiór testów do wykonania i kontroli zdatności. Konieczne jednak jest wybranie ze zbioru wszystkich zadań możliwych do zrealizowania, które pokryją wszystkie funkcje jakie realizuje badany komponent. Proces kontroli komponentu można przedstawić w postaci algorytmu przedstawionego na rysunku 3.5.

Przedstawiony algorytm można wykorzystać do kontroli elementów urządzeń srk nie tylko po naprawach ale również podczas rutynowej kontroli funkcjonowania oraz przy badaniach powypadkowych. Wspólnym elementem w tych badaniach jest wybór określonej funkcji do sprawdzenia. Szczególnie może być przydatny do kontroli elementów rzadko używanych, które należy okresowo kontrolować zgodnie z wymaganiami producenta zawartymi w dokumentacji technicznej lub warunkach stosowania (SRAC). Badania powypadkowe będą polegać na wyborze przez komisję funkcji, która prawdopodobnie może być przyczyną wypadku.



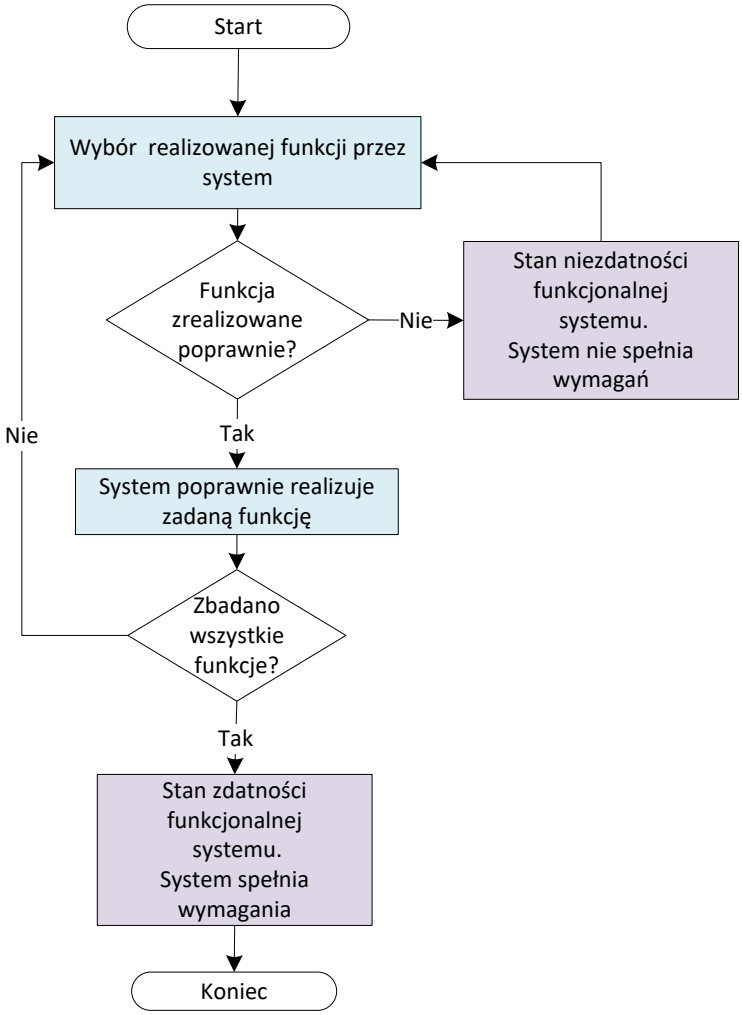
Rys. 3.5 Kontrola funkcjonowania podczas badania urządzenia po naprawie

3.4.2 Kontrola funkcjonowania podczas badania urządzenia w procesie certyfikacji

Podczas realizacji testów certyfikacyjnych sprawdzane są wszystkie funkcje realizowane przez system na zgodność z wymaganiami. W tym przypadku należy przeprowadzić wszystkie testy. Dopiero po skontrolowaniu wszystkich funkcji można określić czy system spełnia postawione wymagania określone w dokumentacji normatywnej, wymaganiach użytkownika. Celem tych badań nie jest określenie z jakich powodów system nie realizuje

danej funkcji. Jeżeli choć jedna z funkcji jest nierealizowana, system jako całość nie spełnia wymagań i nie może zostać dopuszczony do eksploatacji. W badaniach certyfikacyjnych realizuje się również badania bezieczności owe polegające na badaniu reakcji systemu na usterki w warunkach uszkodzeń. Ten rodzaj badań nie jest przedmiotem pracy.

Algorytm kontroli podczas badań certyfikacyjnych przedstawia rysunek 3.6.



Rys. 3.6 Kontrola funkcjonowania podczas badań certyfikacyjnych

4 Model funkcjonalno – diagnostyczny stacyjnych urządzeń srk

4.1 Założenia modelu urządzeń stacyjnych

Struktura funkcjonalna systemu jest dynamiczna bo każde zadanie jest realizowane w ściśle określonej konfiguracji funkcjonalnej komponentów systemu.

Struktura techniczna urządzeń srk na stacji składa się z:

- nastawnicy w skład której wchodzą warstwy:
    - zobrazowania i wprowadzania poleceń (pulpity, monitory),
    - zależnościowa,
    - interfejsów urządzeń zewnętrznych / wykonawczych,
- urządzeń wykonawczych – sterowanych i kontrolowanych:
    - zwrotnice / wykolejnice,
    - sygnalizatory, tarcze, semafory,
    - układy kontroli niezajętości toru i rozjazdu,
- urządzeń ETCS poziomu 1:
    - balisy przełączalne i nieprzełączalne,
    - kodery LEU wraz z interfejsami,

i inne niezbędne elementy mające wpływ na realizację funkcji przez te urządzenia jak np. sieć kablowa, zasilanie.

Celem modelu jest odwzorowanie struktury funkcjonalnej stacyjnego systemu srk. Urządzenia te będą najbardziej reprezentatywne ze względu na występowanie większości typowych elementów występujących w systemach srk oraz realizowanych funkcji. Założenia i ograniczenia modelu są następujące:

1. Model ogranicza się do urządzeń stacyjnych z urządzeniami ETCS L1. Urządzenia liniowe można przedstawić za pomocą modelu usuwając poszczególne elementy nie występujące na szlaku np. zwrotnice. Model urządzeń sygnalizacji przejazdowej budować można na identycznych zasadach jak przedstawiony.
2. Zadaniami jest zbiór możliwych do realizacji przebiegów (funkcji).
3. Modelowa stacja wyposażona jest w zwrotnice z napędami, sygnalizatory, odcinki torowe i zwrotnicowe i elementy przytorowe systemu ETCS L1 balisy i kodery.

4. W modelu nie uwzględniono elementów dodatkowych jak np. powiązania z innymi systemami srk oprócz ETCS.
5. W modelu nie będą uwzględnianie wpływy uszkodzeń otoczenia na działanie badanego systemu (np. awaria zasilania, awaria blokady liniowej).

4.2 Model stacyjnego systemu srk

Z punktu widzenia realizacji testów, których celem jest określenie czy system realizuje określone funkcje, system sterowania ruchem kolejowym będzie rozpatrywany jako zbiór elementów technicznych niezbędnych do realizacji zadań (struktura techniczna):

$$S_{srk} = \{N, S, T, E, Z\} \tag{4.1}$$

gdzie:

S_{srk} – system sterowania ruchem kolejowym,

N – zbiór zwrotnic (wykolejnic),

S – zbiór sygnalizatorów,

T – zbiór odcinków torowych i zwrotnicowych,

E – zbiór balis i LEU,

Z – zbiór zadań realizowanych przez system (przebiegów, sterowań indywidualnych).

W występującym zbiorze elementów systemu ETCS można wyodrębnić:

$$E = \{B, L, I, W, X\} \tag{4.2}$$

gdzie:

B – zbiór grup balis a w nim:

$$B = \{P, N\} \tag{4.3}$$

P – zbiór balis przełączalnych,

N – zbiór balis nieprzełączalnych,

L – zbiór koderów LEU,

I – zbiór interfejsów LEU – balisa dla grup balis,

W – zbiór wiadomości dla określonych grup balis,

X – zbiór powiązań pomiędzy elementami.

Podobnie można wyodrębnić podzbiory dla zwrotnic (pojedyncze, sprzężone, wykolejnice), sygnalizatorów (semafory, sygnalizatory, tarcze) jak i kontrolowanych odcinków torowych drogi przebiegu [1].

Sterowanie urządzeniami wykonawczymi jest realizowane na podstawie określonych algorytmów sterowania i kontroli. W grupie algorytmów sterowania wyróżnić należy:

- algorytm sterowania i kontroli zwrotnicy / wykolejnicy,
- algorytm sterowania i kontroli sygnalizatora,
- algorytm sterowania i kontroli układu kontroli niezajętości,
- algorytm sterowania i kontroli układu przekazywania informacji tor – pojazd, systemu ETCS.

Każde urządzenie jest sterowane na podstawie określonego zbioru indywidualnych algorytmów sterowania:

$$N_i = \{a_{i_k}^N\} \qquad k=1,\ldots.q \tag{4.4}$$

$$S_i = \{a_{i_k}^S\} \qquad k=1,\ldots.p \tag{4.5}$$

$$T_i = \{a_{i_k}^T\} \qquad k=1,\ldots.o \tag{4.6}$$

$$E_i = \{a_{i_k}^E\} \qquad k=1,\ldots.r \tag{4.7}$$

gdzie:

a – algorytmy elementarne i-tego urządzenia,

N, S, T, E – zwrotnica, sygnalizator, odc. torowy, ETCS.

Każde zadanie Z_j jest realizowane w ściśle określonej konfiguracji funkcjonalnej struktury technicznej K_j.

$$Z_j \Rightarrow K_j \tag{4.8}$$

$$K_j = \{(N^j), (S^j), (T^j), (E^j)\} \tag{4.9}$$

gdzie:

Z_j – zadanie,

K_j – konfiguracja funkcjonalna zadania.

Przykładowa konfiguracja funkcjonalna zadania Z_j (zawierająca n zwrotnic, semaforów, odcinków torowych/zwrotnicowych) będzie miała postać:

$$K_j = \{(N_i, N_{i+1}, N_{i+n}), (S_i, S_{i+1}, S_{i+n}), (T_i, T_{i+1}, T_{i+n}), (E_i, E_{i+1}, E_{i+n})\} \quad (4.10)$$

gdzie:

K_j – konfiguracja funkcjonalna zadania.

Każde zadanie realizowane jest w określonej konfiguracji funkcjonalnej, w której poszczególne elementy muszą posiadać odpowiedni status. Doprowadzenie elementu konfiguracji do wymaganego stanu jest realizowane algorytmem sterowania. Konfigurację zadania można zapisać za pomocą zbiorów algorytmów sterowania poszczególnych elementów biorących udział w realizacji zadania:

$$K_j = \begin{Bmatrix} (a^N_{i_k}, a^N_{i+1_k}, a^N_{i+n_k}), (a^S_{i_k}, a^S_{i+1_k}, a^S_{i+n_k}), \\ (a^T_{i_k}, a^T_{i+1_k}, a^T_{i+n_k}), (a^E_{i_k}, a^E_{i+1_k}, a^E_{i+n_k}) \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

Dla każdego urządzenia struktury systemu konieczne jest wyszczególnienie wszystkich stanów w jakich mogą się one znajdować i są to:

- stan fizyczny obiektu: np. aktualne położenie zwrotnicy, stan niezajętości odcinka torowego,
- stan logiczny obiektu:
    - wynikający z realizacji zadania procesu sterowania ruchem np. utwierdzenie, ochronny,
    - wynikający z realizacji polecenia operatora np. zastopowanie.

Stany fizyczne oraz stany logiczne zwane dalej statusami można przedstawić w postaci macierzy kolumnowych stanów. Poszczególne komórki macierzy reprezentowane są wartościami 0 i 1. Przedstawione macierze statusów elementów konfiguracji są macierzami pełnymi tzn. zawierają wszystkie możliwe stany fizyczne i logiczne w jakich może znajdować się element. W terenie, dany element w zależności od pełnionej funkcji może nie posiadać wszystkich statusów.

a. Macierz stanów zwrotnicy

Statusy zwrotnicy N:

1. Położenie prawe (+).
2. Położenie lewe (-).
3. Utwierdzona w przebiegu pociągowym.
4. Utwierdzona w przebiegu manewrowym.
5. Utwierdzona w ochronie bocznej.
6. Utwierdzona w drodze ochronnej.
7. Zastopowana przeciwko nastawianiu.

$$N = [n_1 n_2 \cdots n_n] \tag{4.12}$$

Przykładowo: zwrotnica w położeniu lewym, nieutwierdzona i dostępna w przestawianiu:

$$N = [0100000] \tag{4.13}$$

b. Macierz stanów sygnalizatora

Statusy sygnalizatora S:

1. W macierzy stanów sygnalizatora należy uwzględnić wszystkie możliwe wskazania na sygnalizatorze zgodnie z instrukcją sygnalizacji wraz z sygnałem manewrowym i semaforem ciemnym.
2. Wskazania z pkt. 1 uzupełnione mogą być o wyświetlany wskaźnik W24.
3. Uwzględniono stan utwierdzenia, i ochrony bocznej.

$$S = [s_1 s_2 \cdots s_n] \tag{4.14}$$

Przykładowo: Sygnalizator wskazuje sygnał S1:

$$S = [1000000] \tag{4.15}$$

c. Macierz stanów odcinka torowego / zwrotnicowego

Statusy odcinka torowego / zwrotnicowego T:

1. Wolny.
2. Zajęty.
3. Utwierdzony w przebiegu.
4. W drodze ochronnej.
5. Zajęty logicznie (reset LO).

$$T = [t_1 t_2 \cdots t_n] \tag{4.16}$$

Przykładowo: Odcinek torowy Wolny i Utwierdzony:

$$T = [1010] \tag{4.17}$$

d. Macierz stanów systemu ETCS:

Statusy systemu ETCS E:

1. Wysyłanie telegramu dla wskazania S1,
2. Wysyłanie telegramu dla semafora ciemnego,
3. Wysyłanie telegramu dla wskazania S2,
4. Usterka balisy lub interfejsu C / wysyłanie telegramu domyślnego balisy,
5. Usterka LEU / wysyłanie telegramu domyślnego LEU.

Poprzez stan „Wysyłanie wiadomości..:" rozumie się sprawność kodera LEU, poprawny odczyt wartości prądu w obwodzie światła i interpretacja wskazania, wygenerowanie właściwego do wskazania telegramu i zaprogramowanie nim balisy.

Macierz stanów systemu ETCS będzie przedstawiać się analogicznie jak dla poprzednich elementów systemu srk.

$$E = [e_1 e_2 \cdots e_n] \tag{4.18}$$

Przykładowo: Urządzenia ETCS wysyłają telegram dla wskazania S1:

$$E = [10000] \tag{4.19}$$

Każde zadanie realizowane jest w określonej konfiguracji funkcjonalnej, w której poszczególne elementy muszą posiadać odpowiedni status.

Zdatność funkcjonalna urządzeń srk jest to zdolność systemu do przechodzenia pomiędzy zdefiniowanymi stanami oraz doprowadzenie do określonego stanu funkcjonalnego i w nim pozostawania na czas realizacji zadania. Konfiguracja elementów i ich status zależny jest od realizowanego zadania.

Uzyskanie stanu „położenie lewe" i-tej zwrotnicy wymaga wykorzystania algorytmu sterowania a_{i2}. Analogicznie, uzyskanie innego statusu pozostałych elementów konfiguracji funkcjonalnej zadania w macierzy wymaga wykorzystania dedykowanego algorytmu tego elementu.

$$N_i = \left[a_{i1}^N a_{i2}^N a_{i3}^N a_{i4}^N a_{i5}^N a_{i6}^N a_{i7}^N\right] \tag{4.20}$$

Dla pozostałych urządzeń konfiguracji zapis pozostaje analogiczny.

$$T_i = \left[a_{i1}^T a_{i2}^T \cdots a_{in}^T\right] \tag{4.21}$$

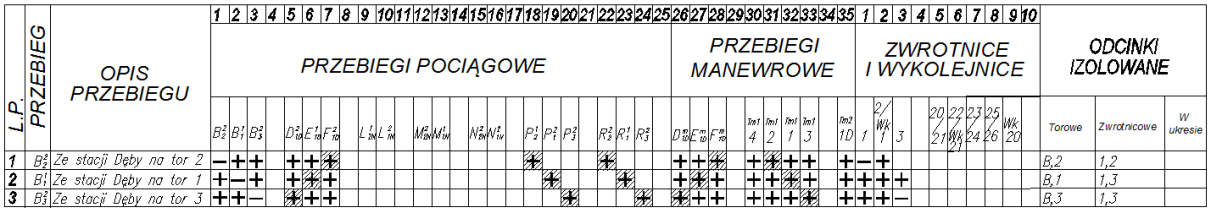
$$S_i = \left[a_{i1}^S a_{i2}^S \cdots a_{in}^S\right] \tag{4.22}$$

$$E_i = \left[a_{i1}^E a_{i2}^E \cdots a_{in}^E\right] \tag{4.23}$$

Przejście do określonego stanu funkcjonalnego - konfiguracji funkcjonalnej inicjowane jest poleceniem nastawczym wydanym z pulpitu nastawczego przez dyżurnego ruchu. Polecenie nastawcze może mieć postać polecenia indywidualnego dotyczącego jednego elementu konfiguracji systemu lub kilku elementów. Obsługa plecenia indywidualnego spowoduje reakcję tylko elementu do którego jest ono adresowane. Polecenie nastawienia przebiegu spod semafora polega na zaznaczeniu początku i końca drogi przebiegu oraz wybraniu rodzaju przebiegu jaki ma być nastawiony (pociągowy, manewrowy). Realizacja polega na zaznaczeniu wybranej drogi przebiegu, kontroli dostępności elementów, doprowadzeniu elementów do wymaganego stanu, zamknięciu przed przestawianiem i utwierdzeniu a następnie wyświetlany jest sygnał zezwalający na jazdę.

Polecenia nastawcze wyszczególnione są w dokumentacji projektowej urządzeń srk w postaci tablicy zależności (rys. 4.1) lub kart przebiegów. Podstawowe informacje zawarte tych dokumentach zawierają:

- wykaz przebiegów pociągowych i manewrowych możliwych do zrealizowania na stacji,
- wykaz sprzeczności przebiegów i wykluczeń,
- wykaz kontrolowanych odcinków torowych i zwrotnicowych należących do danego przebiegu,
- wykaz stanów i statusów zwrotnic i wykolejnic w drodze przebiegu.



Rys. 4.1 Fragment tablicy zależności

Polecenia indywidualne oraz przebiegi zdefiniowane w wykazie zależności są dostępne z poziomu panelu operatora oraz możliwe do wykorzystania w ramach kontroli funkcjonowania. Pozwala to na realizację testów bez wprowadzania dodatkowych sygnałów oraz stosowania dodatkowej aparatury. Są to naturalne sygnały wejściowe a reakcja systemu na polecenia jest rzeczywista.

Zbiór zadań (poleceń) wraz z użytą konfiguracją funkcjonalną można przedstawić w formie tabelarycznej (tab. 2).

Tabela 2. Zbiór zadań zawierający konfiguracje funkcjonalne

			Algorytmy sterowania i kontroli											
			Zwrotnice						Semafory			Odcinki torowe i zwrotnicowe		
			a_{11}^{N}	a_{12}^{N}	a_{1n}^{N}	a_{21}^{N}	a_{22}^{N}	a_{2n}^{N}	a_{A1}^{S}	a_{A2}^{S}	a_{An}^{S}	a_{A1}^{T}	a_{A2}^{T}	a_{An}^{T}
Zadania	Polecenia przebiegowe	ZP_1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
		ZP_2	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1
		ZP_3	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
		…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
		ZP_n	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
	Polecenia indywidualne	ZI_1	1	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
		ZI_2	0	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
		ZI_3	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
		…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
		ZI_n	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	1

gdzie:

ZP, ZI – zadania: polecenia przebiegowe ZP, polecenia indywidualne ZI,

ZP_1, ZP_2, ZP_n – zadania w postaci przebiegów – polecenia przebiegowe zgodne z tablicą zależności,

ZI_1 – polecenie indywidualne przestawienia zwrotnicy w +,

ZI_2 – polecenie indywidualne przestawienia zwrotnicy w –,

ZI_n – polecenie resetu LO.

Aby skontrolować realizację określonych algorytmów należy wyszukać zadania, w których badane algorytmy są używane aby doprowadzić urządzenie do danego stanu. Jeżeli dany kontrolowany algorytm występuje tylko w jednym zadaniu, zadanie to jest sprawdzeniem niezbędnym, koniecznym do zrealizowania.

5 Metoda wyznaczania testów funkcjonalnych urządzeń srk

5.1 Wstępne informacje

5.1.1 Pojęcia i określenia

Test - pojedyncze sprawdzenie lub zbiór sprawdzeń niezbędnych do określenia stanu niezawodnościowego obiektu – badanego algorytmu.

Sprawdzenie dostępne – sprawdzenie możliwe do zrealizowania w danej konfiguracji funkcjonalnej systemu. Za pomocą tego sprawdzenia można skontrolować jeden lub kilka algorytmów. Zbiór wszystkich sprawdzeń dostępnych zawiera sprawdzenia niezbędne i sprawdzenia nadmiarowe.

Tor sprawdzeń – zbiór sprawdzeń obejmujący kilka sprawdzeń pojedynczych za pomoc którego można skontrolować kilka algorytmów.

Sprawdzenie niezbędne (konieczne) – sprawdzenie, którego nie można pominąć w zbiorze testów, zawiera co najmniej jeden algorytm niewystępujący w innych sprawdzeniach.

Sprawdzenie nadmiarowe – sprawdzenie, którego tor sprawdzeń zawiera co najmniej jeden algorytm występujący w innych sprawdzeniach. Sprawdzenie to wybierane jest do programu ze względu na występowanie innych algorytmów w torze sprawdzeń.

Sprawdzenie najbardziej efektywne – sprawdzenie, którego wykonanie dostarczy najwięcej informacji o badanym systemie. Z reguły będzie to sprawdzenie zawierające najwięcej algorytmów do badania.

Sprawdzenie celowe – sprawdzenie za pomocą którego można określić stan konkretnego algorytmu lub grupy algorytmów (elementu lub grupy elementów konfiguracji). Sprawdzenie celowe ściśle związane jest z celem i zakresem przeprowadzania testów funkcjonalnych.

Zbiór sprawdzeń celowych – podzbiór zbioru sprawdzeń dostępnych zredukowany ze względu na cel badań.

5.1.2 Cel i zakres metody

Celem metody jest wyznaczenie możliwie najmniej licznego zbioru testów służącego do kontroli stanu urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Ilość i zakres testów jest zależny od ich celu. W jednym przypadku konieczne będzie przebadanie wszystkich funkcji, w innym testy będą skupione na funkcjach realizowanych przez poszczególne elementy systemu lub

grupy elementów. W badaniach certyfikacyjnych zakres badań będzie obejmował wszystkie algorytmy zaimplementowane w systemie więc dla tych badań zbiór sprawdzeń dostępnych będzie najliczniejszy. W sprawdzeniach realizowanych np. po naprawie zbiór ten będzie ograniczał się wyłącznie do sprawdzenia algorytmów realizowanych przez naprawiany lub wymieniany element. Podstawowo można wyróżnić cele, których realizacja wymaga wykonywania testów funkcjonalnych:

1. Certyfikacja aplikacji w zakresie zgodności z wymaganiami zamawiającego.
2. W ramach badań eksploatacyjnych podczas:
    a. wszelkich zmian wprowadzanych w urządzeniach,
    b. okresowej kontroli,
    c. oceny dostępności systemu.
3. Napraw i wymian podsystemów (komponentów systemu):
    a. sterownika,
    b. karty,
    c. urządzenia zewnętrznego (wraz z ich infrastrukturą towarzyszącą):
        i. sygnalizatora,
        ii. napędu,
        iii. układu kontroli niezajętości.

Grupy testów odnoszące się do całości systemu wymagają realizacji wszystkich testów, nie ma możliwości ograniczenia funkcji niepodlegających testowaniu. Są to badania certyfikacyjne i badania dostępności systemów. W obu tych przypadkach można jednak wybierać grupy testów tak, aby jak aby ich realizacja jak najmniej wpływała na dostępność systemu oraz ich realizacja nie wpływała i ograniczała aktualnej pracy posterunku ruchu. W przypadku pozostałych testów do problemu można podejść dokonując dekompozycji systemu pod kątem badanych elementów. Polega to na wybieraniu odpowiednich zadań, w których wykorzystywane są algorytmy odpowiedzialne za sterowanie danym komponentem, którego jest konieczność sprawdzenia. Zawężając zadania ograniczamy ilość testów do wykonania a co za tym idzie minimalizujemy ogólny koszt testów. Skracamy również czas trwania testów, jest ich mniej do wykonania oraz zmniejszamy przez to negatywny wpływ testów na dostępność systemu. Metoda nie będzie służyć do lokalizacji uszkodzonych komponentów.

Wyznaczanie zbioru testów można podzielić na dwa etapy. Pierwszy z nich polega na utworzeniu zbioru testów zawierającego testy do określenia stanu zdatności funkcjonalnej badanego systemu. W grupie tych testów będą testy niezbędne oraz nadmiarowe. Założeniem tego etapu jest, że każda badany algorytm systemu powinien zostać sprawdzony co najmniej jeden raz. Drugi etap polega na uporządkowaniu określanego uprzednio utworzonego zbioru testów pod kątem określonego kryterium. Kryterium jest koszt testu oraz ilość informacji jaką można uzyskać o badanym obiekcie realizując jeden test. Otrzymany zbiór testów będzie zbiorem suboptymalnym.

W pracy ograniczono się do wyznaczania suboptymalnego zbioru sprawdzeń z dostępnych poleceń z poziomu pulpitu dyżurnego ruchu. Do tego celu zostanie wykorzystana tablica zależności (odpowiednio zmodyfikowana na potrzeby pracy) opisująca wszystkie możliwe zadania (przebiegi) do zrealizowania na posterunku.

Testy, zależnie od decyzji zarządcy infrastruktury, odbywają się na czynnym lub z wyłączonym z ruchu układzie torowym (zamknięcia torowe). Realizacja procesów ruchowych na stacji jest dominująca nad realizacją procesów obsługi diagnostycznej. Ruch pociągów ma odbywać się niezakłócony a wszelkie działania związane z przeglądami, naprawą czy konserwacją urządzeń wykonywane są w przerwach w ruchu. Uporządkowanie zbioru testów pod kątem realizacji ich w odpowiedniej kolejności jest więc niecelowe gdyż w przypadku licznego zbioru testów praktycznie niemożliwym jest wykonanie go w takiej kolejności jakiej byłby zaprojektowany. Uporządkowanie wymaga to dodatkowych prac a uzyskany efekt może zostać szybko zniwelowany przez konieczność realizacji zadania przewozowego lub fizycznego braku możliwości wykonania testu. Ponadto, w przypadku gdy testy funkcjonalne będą realizowane bez zamknięć torowych a realizacja zadania ruchowego (przebiegu) będzie pokrywać się z testem z wyznaczonego zbioru można uznać, że test ten został zrealizowany przebiegiem więc nie będzie już powtarzany.

Zbiór testów wyznaczany jest dla następujących założeń:

1. Obiektem kontroli jest zbiór wszystkich funkcji realizowanych przez system srk. Elementami kontrolowanymi są algorytmy sterowania i kontroli $\boldsymbol{a_i^K}$ poszczególnych urządzeń konfiguracji funkcjonalnej systemu zdefiniowane w zbiorze $\boldsymbol{A_i}$.
2. Dostępny jest zbiór sprawdzeń dostępnych $\boldsymbol{D = \{d_j\}}$ wystarczający dla potrzeb kontroli stanu funkcjonalnego.

3. Dla każdego sprawdzenia d_j istnieje zbiór algorytmów elementarnych a_i^K . Zbiór algorytmów elementarnych jest torem sprawdzenia d_j
4. Dostępny jest zbiór kosztów realizacji sprawdzeń $C = \{c_j\}$
5. Należy wyznaczyć zbiór sprawdzeń D_{opt} niezbędny i wystarczający dla potrzeb kontroli stanu funkcjonalnego. Zbór ten jest zbiorem optymalnym dla określonego kryterium.

5.1.3 Koszt sprawdzeń

Na koszt sprawdzeń składa się szereg elementów opisanych w podrozdziale 3.1.2.2. W celu realizacji dowolnego sprawdzenia należy wykonać szereg niezbędnych działań przygotowujących urządzenia do testu i nadaniu odpowiedniego statusu elementom. Najmniejszy zakres prac wymagają sprawdzenia, w których nie ma potrzeby zmiany stanu urządzeń, czyli stan obecny jest stanem początkowym testu. W większości testów istnieje konieczność nadania urządzeniom odpowiedniego statusu fizycznego i logicznego i w zależności od stopnia trudności oraz zakresu prac z tym związanych wyróżnić można tu dwie grupy. Jedną z nich będzie grupa testów wymagających zmiany stanu badanego urządzenia i wymagających zaangażowania mniejszego zasobu personelu i działań. Drugą grupą są testy, w których konieczna jest zmiana stanu urządzeń powiązanych funkcjonalnie. Dla przykładu badając urządzenia stacyjne przy realizacji przebiegów wyjazdowych konieczna jest obsługa blokady liniowej lub zmiana stanu samoczynnej sygnalizacji przejazdowej w przypadku powiązania (lub uzależnienia) jej w przebiegach. Generuje to więc potrzebę zaangażowania dyżurnego ruchu i personelu pomocniczego na sąsiednim posterunku oraz ustawienie blokady zajmuje też więcej czasu więc i dłużej i większymi siłami doprowadzamy urządzenia do stanu początkowego. Oszacowanie dokładnych kosztów każdego testu byłoby więc bardzo trudne i czasochłonne, wymagałoby dużej ilości informacji dotyczących specyfiki pracy posterunku, personelu, używanego sprzętu itp. Ponadto z doświadczeń Autora z realizowanych testów bardzo trudno jest zrealizować plan testów w takiej kolejności jakiej został uporządkowany. Nieprzewidywalne zdarzenia, usterki, czy chociażby ruch pociągów nierozkładowych uniemożliwia dokładną realizację planu testów. Ponadto jakiekolwiek zmiany w kolejności realizacji programu również wpływają na koszt kolejnych badań. Konieczne jest wtedy przeprowadzenie wyjaśnień i uzgodnień z personelem przeprowadzającym testy dotyczących powodu zmian i ustalenia nowej kolejności czy chociażby zmiana stanu urządzeń. Dla potrzeb

pracy określono więc tzw. uogólniony koszt sprawdzeń. Po analizach i doświadczeniu z przeprowadzania testów wyodrębniono trzy grupy kosztów.

C1 – realizacja testu nie wymaga nadawania stanu (statusu) komponentów (elementów) badanego systemu i jego otoczenia systemowego (systemów powiązanych funkcjonalnie),

C2 – realizacja testu wymaga symulacji stanu (statusu) elementów badanego systemu – przykładowo symulacja zajętości odcinka torowego / zwrotnicowego, ustawienie kierunku blokady,

C3 – realizacja testu wymaga zmiany stanu (statusu) systemów powiązanych funkcjonalnie.

Przykładowo:

- zmiana kierunku blokady liniowej,
- symulacja zajętości odstępu blokowego,
- zmiana stanu sygnalizacji przejazdowej.

Dla łatwiejszego określania poszczególnych kosztów sprawdzeń wprowadzono zależność:

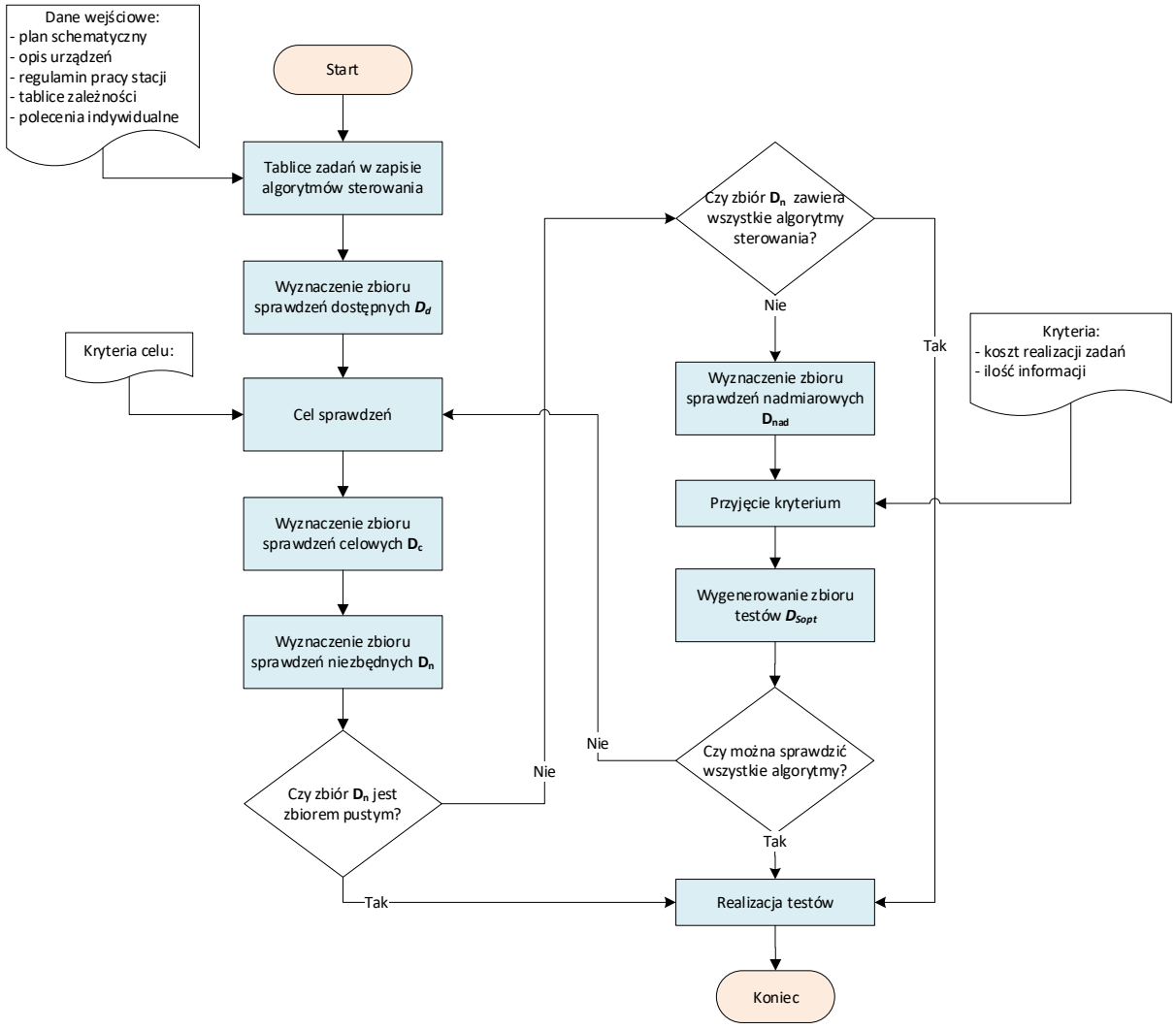
$$C1 < C2 < C3 \tag{5.1}$$

Czas i koszty dodatkowe związane z doprowadzeniem systemu i jego otoczenia do stanu umożliwiającego realizację określonego testu są bardzo różne. Wynikają z rozwiązań technicznych stosowanych w systemie badanym i systemach powiązanych funkcjonalnie np. typu blokady, sygnalizacji przejazdowej (koszt przejazdu pociągu można szacować jako czas zamknięcia przejazdu dla kierowców), rodzaj układu kontroli niezajętości.

5.1.4 Opis algorytmu wyznaczania suboptymalnego zbioru sprawdzeń

Wyznaczenie optymalnego zbioru sprawdzeń ze zbioru wszystkich sprawdzeń jest czasochłonne i niekiedy skomplikowane. Wynika to z faktu liczności zbioru sprawdzeń dostępnych $\boldsymbol{D_d}$ oraz mnogości docelowych zbiorów sprawdzeń możliwych do wygenerowania. Suboptymalny zbiór sprawdzeń można otrzymać w sposób polegający na wyznaczeniu ze zbioru sprawdzeń dostępnych $\boldsymbol{D_d}$ podzbiór sprawdzeń celowych $\boldsymbol{D_c}$. Eliminujemy w ten sposób testy nie dające informacji o badanych elementach konfiguracji. Następnie, ze zbioru $\boldsymbol{D_c}$ należy wyznaczyć sprawdzenia niezbędne $\boldsymbol{D_n}$. Otrzymany zbiór zbadań, sprawdzamy czy jest wystarczający do celu kontroli stanu funkcjonalnego urządzeń

oraz czy wszystkie testowane algorytmy mają pokrycie testami. Jeżeli warunek jest spełniony można przystąpić do realizacji testów. Jeżeli zbiór ten nie jest zbiorem wystarczającym należy uzupełnić go o dodatkowe sprawdzenia nadmiarowe $\boldsymbol{D_{nad}}$. Zbiór nadmiarowy równocześnie jest optymalizowany pod kątem określonego kryterium i przyjętych ograniczeń. Zgodnie z założeniami tym kryterium jest uogólniony koszt poszczególnych testów natomiast ograniczeniem jest wybór zadań dających największy przyrost informacji diagnostycznej. Kryterium optymalizacji polega na wyborze sprawdzeń o najniższym koszcie. Ogólny schemat algorytmu wyznaczania optymalnego zbioru sprawdzeń przedstawiono na rysunku 5.1.



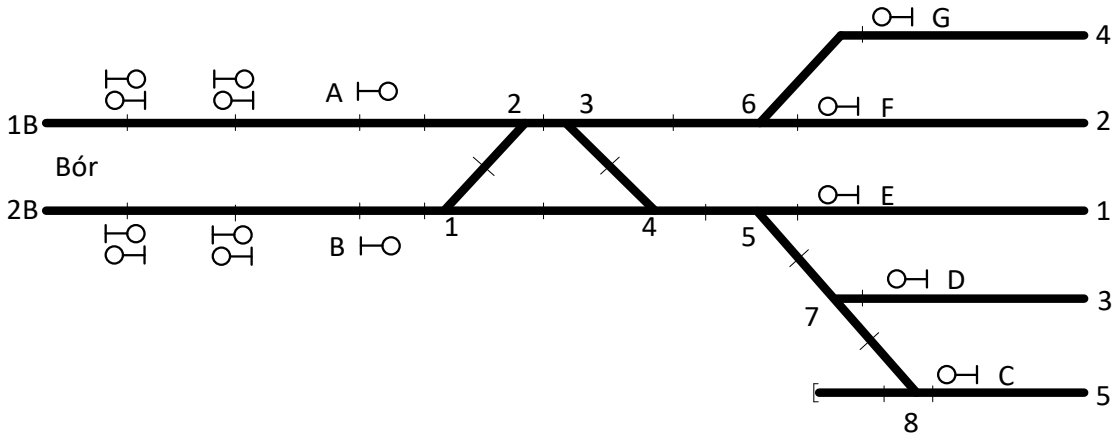
Rys. 5.1 Ogólny algorytm postępowania wyznaczania suboptymalnego zbioru sprawdzeń

5.2 Algorytm stosowania metody

5.2.1 Charakterystyka badanego obiektu – układ stacyjny

Badanym obiektem są urządzenia sterowania ruchem kolejowym wykonane w technologii komputerowej. Zasadniczo technologia urządzeń zależnościowych w większości przypadków nie będzie znacząca, ponieważ testy polegają na realizacji funkcji a nie sposobie ich realizacji przez system. Przedstawiony wariant nie uwzględnia urządzeń ETCS L1, system jest powiązany z warstwą podstawową, ale nie wpływa na jej funkcje. Tematykę badania urządzeń ETCS przedstawiono w artykule [13] z wykorzystaniem metody, której dotyczy rozprawa. Fragment układu torowego (głowicę) badanej stacji przedstawiono na rysunku 5.2. W przykładowym systemie można wyróżnić elementy znajdujące się w konfiguracji każdego posterunku:

- Tory szlakowe z urządzeniami liniowymi (czterostawna blokada liniowa samoczynna na szlaku do stacji Bór),
- Semafory wjazdowe A, B i wyjazdowe C, D, E, F, G,
- Rozjazdy 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 o skosie 1:9,
- Tory stacyjne 1, 2, 3, 4, 5,
- Odcinki kontrolowane:
    - torowe itA, itB, it1, it2, it3, it4, it5,
    - zwrotnicowe Iz1, Iz2, Iz3, Iz4, Iz5, Iz6, Iz7, Iz8.



Rys. 5.2 Układ torowy przykładowej aplikacji wraz z istotnymi elementami (fragment)

Badanie stanu sprawności urządzeń srk odbywać się będzie z wykorzystaniem pulpitu nastawczego a wynik sprawdzenia będzie obserwowany poprzez zmianę statusu urządzeń w terenie, wskazań i zobrazowania stanu urządzeń na pulpicie oraz odczycie informacji z monitorów diagnostycznych. Wynik pozytywny będzie oznaczał prawidłową zmianę elementów zobrazowania semafora, zwrotnicy, kontrolowanego odcinka i innych elementów. Jeżeli zmiana elementów nie będzie zachodzić lub będzie nieadekwatna mówimy o negatywnym wyniku sprawdzenia. Analogiczne postępowanie będzie z interpretacją komunikatów diagnostycznych. Poprawna realizacja zadania świadczy o pełnej sprawności funkcjonalnej badanego elementu i jego składowych. Znaczy to, że sprawny jest nie tylko sam element konfiguracji np. zwrotnica, ale sprawne są części składowe: napęd, połączeniowa sieć kablowa, układ nastawczy czy karta sterownika zależnościowego. Badaniu podlegają zatem wszystkie składniki struktury elementu.

Możliwe do realizacji przebiegi na stacji i ograniczenia:

- Spod semaforów wjazdowych A i B na wszystkie tory stacyjne 1÷5,
- Spod semaforów wyjazdowych na wszystkie tory szlakowe w kierunkach zasadniczym i przeciwnym do zasadniczego,
- Możliwa jest realizacja przebiegów bez zatrzymania ze stacji Bór po torze stacyjnym 1 i 2 (wyjazd na blokadę półsamoczynną),
- Jazda po rozjazdach w kierunku zwrotnym z prędkością 40 km/h wynikająca z przyjętego skosu rozjazdów,
- Wskazania na sygnalizatorach zgodne są z zasadami instrukcji sygnalizacji i zasadami projektowania.

Dla uproszczenia wprowadzono ograniczenia w postaci:

- brak zorganizowanych jazd manewrowych,
- brak przebiegów wariantowych w obu kierunkach po rozjazdach 1÷4,
- brak ochrony realizowanej przez zwrotnicę i semafor,
- polecenia indywidualne nie będą uwzględniane,
- brak zabudowanego systemu ETCS.

Uproszczenia te nie będą wpływać na metodologię.

Zbiorem sprawdzeń dostępnych jest zbiór wszystkich przebiegów pociągowych (zadania przebiegowe) możliwych do nastawienia dla danej konfiguracji aplikacji. Liczność zbioru sprawdzeń dostępnych uzależniona jest od topologii stacji i szlaków stycznych oraz konfiguracji urządzeń zależnościowych stacyjnych i liniowych. Przebiegi w systemie implementowane są na podstawie zapisu zależności w postaci tablicy zależności lub kart przebiegów, dokumentów będących częścią projektu wykonawczego. Przebiegi układu torowego badanego obiektu przedstawionego na (rys 5.2) przedstawia tablica zależności przedstawiona na rysunku 5.3.

Lp.	Przebieg	Opis przebiegu	Przebiegi pociągowe																						Zwrotnice								Odcinki izolowane	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	kn	kn	kn	kn	kn	kn	kn	kn		
			A^2_1	A^1_2	A^2_3	A^2_4	A^2_5	B^1_1	B^2_2	B^2_3	B^2_4	B^2_5	C^2_1	C^2_2	D^2_1	D^2_2	E^2_1	E^1_2	F^1_1	F^2_2	G^2_1	G^2_2	1	2	3	4	5	6	7	8	torowe	zwrotnicowe
1	A^2_1	Ze st. Bór na tor 1	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	⁄	+	+	+	+	+		+	-	-	+				A, 1	2, 3, 4, 5
2	A^1_2	Ze st. Bór na tor 2	+	-	+	+	+		+		+		+		+		+		⁄	+	+	+		+	+			+			A, 2	2, 3, 6
3	A^2_3	Ze st. Bór na tor 3	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	⁄	+	+	+	+	+	+	+		+	-	-	-		+		A, 3	2, 3, 4, 5, 7
4	A^2_4	Ze st. Bór na tor 4	+	+	+	-	+		+		+		+		+		+		+	+	⁄	+		+	+			-			A, 4	2, 3, 6
5	A^2_5	Ze st. Bór na tor 5	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	⁄	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	-	-	-		-	-	A, 5	2, 3, 4, 5, 7, 8
6	B^1_1	Ze st. Bór na tor 1	+		+		+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	⁄		+		+	+			+	+				B, 1	1, 4, 5
7	B^2_2	Ze st. Bór na tor 2	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	⁄	+	+	-	-	+			+			B, 2	1, 2, 3, 6
8	B^2_3	Ze st. Bór na tor 3	+		+		+	+	+	-	+	+	+	+	+	⁄	+	+		+		+	+			+	-		+		B, 3	1, 4, 5, 7
9	B^2_4	Ze st. Bór na tor 4	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	⁄	-	-	+			-			B, 4	1, 2, 3, 6
10	B^2_5	Ze st. Bór na tor 5	+		+		+	+	+	+	+	-	+	⁄	+	+	+	+		+		+	+			+	-		-	-	B, 5	1, 4, 5, 7, 8
11	C^2_1	Do st. Bór po torze 1B	+	+	+	+	⁄	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	-	-	-		-	-	A, 5	2, 3, 4, 5, 7, 8
12	C^2_2	Do st. Bór po torze 2B	+		+		+	+	+	+	+	⁄	+	-	+	+	+	+		+		+	+			+	-		-	-	B, 5	1, 4, 5, 7, 8
13	D^2_1	Do st. Bór po torze 1B	+	+	⁄	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+		+	-	-	-		+		A, 3	2, 3, 4, 5, 7
14	D^2_2	Do st. Bór po torze 2B	+		+		+	+	+	⁄	+	+	+	+	+	-	+	+		+		+	+			+	-		+		B, 3	1, 4, 5, 7
15	E^2_1	Do st. Bór po torze 1B	⁄	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+		+	-	-	+				A, 1	2, 3, 4, 5
16	E^1_2	Do st. Bór po torze 2B	+		+		+	⁄	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-		+		+	+			+	+				B, 1	1, 4, 5
17	F^1_1	Do st. Bór po torze 1B	+	⁄	+	+	+		+		+		+		+		+		-	+	+	+		+	+			+			A, 2	2, 3, 6
18	F^2_2	Do st. Bór po torze 2B	+	+	+	+	+	+	⁄	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+			+			B, 2	1, 2, 3, 6
19	G^2_1	Do st. Bór po torze 1B	+	+	+	⁄	+		+		+		+		+		+		+	+	-	+		+	+			-			A, 4	2, 3, 6
20	G^2_2	Do st. Bór po torze 2B	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+			-			B, 4	1, 2, 3, 6

Rys. 5.3 Tablica zależności dla stacji przykładowej aplikacji

Tablica ta dodatkowo może zostać uzupełniona poleceniami indywidualnymi dla urządzeń. Polecenia te mogą się różnić w zależności od technologii wykonania urządzeń srk ale podstawowo można wyróżnić polecenia: przestawienie zwrotnicy (+, -), zastopowanie zwrotnicy, semafora, reset sekcji LO, oraz specyficzne dla danego systemu. Dodatkowo można uwzględnić polecenia związane z obsługą urządzeń z otoczenia systemowego: blokady liniowej, sygnalizacji przejazdowej itp. Spowoduje to mocne rozbudowanie tablicy więc na

potrzeby prezentacji metody nie ma potrzeby dodawać poleceń indywidualnych, zgodnie z założeniami.

Testy, w ramach badania dostępności, ponaprawcze lub w ramach procedur utrzymania realizowane są dla:

1. Urządzenia zewnętrznego – napędu zwrotnicowego, sygnalizatora, układu kontroli niezajętości z uwzględnieniem elementów towarzyszących,
2. Sterownika zewnętrznego (karty) – interfejsu służącego w urządzeniach komputerowych do sterowania i kontroli urządzeń zewnętrznych i komunikacji z systemami otoczenia systemowego,
3. Jednostki centralnej - jednostki zależnościowej.

Celem jest określenie stanu sprawności badanego obiektu. Należy więc określić stan elementów, z których składa się obiekt. Badane elementy będą rozumiane jako zbiory algorytmów, składające się z algorytmów elementarnych. Pod pojęciem algorytmu elementarnego będziemy rozumieć jedną z funkcji jakie realizuje element w nastawianym przebiegu lub realizowanym poleceniu. Uwzględniając układ torowy stacji, powyższe założenia i uproszczenia określono możliwe wskazania na sygnalizatorach oraz przypisano im indywidualne algorytmy. Algorytmy uwzględniają wskazania na sygnalizatorach wyjazdowych zależnie od stanu zajętości dwóch następnych za sygnalizatorem wyjazdowym odcinków torowych na szlaku. Dla semaforów wjazdowych A i B wskazania dla toru 3, 4 i 5 są adekwatne dla przebiegu z zatrzymaniem natomiast dla jazd po torze 1 i 2 również przebiegów bez zatrzymania. Analogicznie przypisano algorytmy dla odcinków torowych i zwrotnicowych oraz zwrotnic.

Algorytmy semafora:

Algorytm	aX1	aX2	aX3	aX4	aX5	aX6	aX7	aX8
Wskazanie semafora	S1	S2	S3	S5	S10	S11	S13	W24

gdzie:

a – algorytm,

X – nazwa semafora (A, B, C, …), dla którego budowany jest zbiór algorytmów,

1 – lp algorytmu: tu wskazania.

Wskazania semafora (S1, S2 itd.) są zgodne z układem torowym stacji oraz zależne od zastosowanych ograniczeń i urządzeń liniowych. Symbol wskazania zgodny z instrukcją sygnalizacji. Algorytm uwzględnia wyłącznie wskazania jakie są możliwe do wyświetlenia na semaforach danego posterunku zgodnie z instrukcją sygnalizacji wraz ze wskaźnikami, w tym przypadku tylko W24.

Algorytmy zwrotnicy:

Algorytm	aX1	aX2
Stan zwrotnicy	+	-

gdzie:

a – algorytm,

X – nr zwrotnicy (1, 2, 3,…), dla której budowany jest zbiór algorytmów,

1 – lp algorytmu.

Algorytm niezajętości odcinka torowego i zwrotnicowego:

Algorytm	aX1	aX2
Stan niezajętości	wolny	zajęty

gdzie:

a – algorytm,

X – odc. torowy/zwrotnica (It, Iz, ..), dla której budowany jest zbiór algorytmów,

1 – lp algorytmu.

5.3 Wyznaczanie zbioru testów

A. Zdefiniowanie zbioru sprawdzeń dostępnych do wykonania (badanych algorytmów)

Definiowanie sprawdzeń dostępnych, a więc takich, które są możliwe do zrealizowania na danym posterunku, realizowane jest na podstawie układu torowego, wykazu przebiegów i dostępnych poleceń. W tym celu należy dokonać przekształcenia tablicy zależności w tablicę przedstawiającą przebiegi, ale zawierające elementy zapisane za pomocą algorytmów sterowania i kontroli. Do uzupełniania tablicy można posiłkować się dostępną dokumentacją

stacji, regulaminem pracy posterunku i planem schematycznym np. określania wskazań na sygnalizatorach zależnych od rodzaju blokady liniowej czy jazd wariantowych.

Dla układu torowego przedstawionego na rysunku 5.2 tablica zadań - zmodyfikowana tablica zależności zawierająca badane algorytmy sterowania i kontroli jest przedstawiona na rysunku 5.4. Tablica zawiera kolumnę z kosztem realizacji zadań, identyfikator przebiegu i jego opis, oraz sekcje z elementami przebiegu jak: sekcja ze zwrotnicami Z i ich numerami, sekcja z semaforami/wskazaniami S oraz sekcja z odcinkami torowymi /zwrotnicowymi z nazwami odcinków.

Rys. 5.4 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli

Dla poprawy czytelności poniżej zamieszczono fragmenty tablicy z rys 5.4 zawierającej sekcję zwrotnicową dla przebiegów wjazdowych spod semaforów A i B.

		Przebieg / zadanie																	
Koszt zadania			Opis	Zwrotnice Z															
C				1		2		3		4		5		6		7		8	
				a11	a12	a21	a22	a31	a32	a41	a42	a51	a52	a61	a62	a71	a72	a81	a82
3		A1	Na tor 1			1			1		1	1							
8	bz	A11	Na tor 1			1			1		1	1							
3		A2	Na tor 2			1		1						1					
8	bz	A21	Na tor 2			1		1						1					
3		A3	Na tor 3			1			1		1		1			1			
3		A4	Na tor 4			1		1							1				
3		A5	Na tor 5			1			1		1		1		1		1		1
3		B1	Na tor 1	1						1		1							
8	bz	B11	Na tor 1	1						1		1							
3		B2	Na tor 2		1		1	1						1					
8	bz	B21	Na tor 2		1		1	1						1					
3		B3	Na tor 3	1						1			1			1			
3		B4	Na tor 4		1		1	1							1				
3		B5	Na tor 5	1						1			1				1		1

gdzie:

C – uogólniony koszt realizacji zadania (np. 3 dla przebiegu A1),

A1, A11 – nr przebiegu na tor 1,

A2, A21 – nr przebiegu na tor 2,

bz – wariant przebiegu bez zatrzymania (wymaga obsługi urządzeń liniowych, ułożenia drogi przebiegu na wyjazd ze stacji stąd większy koszt niż w analogicznym przebiegu na ten sam tor (A1, A11),

1, 2, 3, … 8 – numer zwrotnicy,

a11 - w sekcji zwrotnicowej algorytm zwrotnicy 1 realizujący ustawienie zwrotnicy w +,

a12 - w sekcji zwrotnicowej – algorytm zwrotnicy 1 realizujący ustawienie zwrotnicy w -,

„1” w komórce odpowiada korzystaniu z algorytmu w zadaniu.

Komórka pusta oznacza, że algorytm nie jest wykorzystywany w zadaniu/zadaniach.

Fragment tablicy zawierającej sekcję dla przebiegów wjazdowych spod semaforów A i B.

		Przebieg / zadanie																		
Koszt zadania			Opis	Semafory / wskazania S																
C				A								B								
				aA1	aA2	aA3	aA4	aA5	aA6	aA7	aA8	aB1	aB2	aB3	aB4	aB5	aB6	aB7	aB8	
3		A1	Na tor 1							1										
8	bz	A11	Na tor 1		1															
3		A2	Na tor 2				1													
8	bz	A21	Na tor 2					1												
3		A3	Na tor 3							1										
3		A4	Na tor 4							1										
3		A5	Na tor 5							1										
3		B1	Na tor 1												1					
8	bz	B11	Na tor 1										1							
3		B2	Na tor 2															1		
8	bz	B21	Na tor 2													1				
3		B3	Na tor 3															1		
3		B4	Na tor 4															1		
3		B5	Na tor 5															1		

gdzie:

A, B – nazwa semafora,

aA2 - w sekcji semaforów – algorytm semafora A realizujący wyświetlenie wskazania 2, wg założeń jest to wskazanie S2 - jazda z największą dozwoloną szybkością,

aA7 - w sekcji semaforów – algorytm semafora A realizujący wyświetlenie wskazania S13 - jazda z szybkością nieprzekraczającą 40 km/h, a przy następnym semaforze stój,

„1” - w komórce odpowiada przypisaniu algorytmu do zadania.

Komórka pusta oznacza, że algorytm nie jest wykorzystywany w zadaniu/zadaniach.

Fragment tablicy zawierającej sekcję dla odcinków torowych/zwrotnicowych.

		Przebieg / zadanie																											
Koszt zadania			Opis	Odc torowe / zwrotnicowe																									
C				ltA		ltB		lt1		lt2		lt3		lt4		lt5		lz1		lz2		lz3		lz4		lz5		lz6		lz7		lz8	
				a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12	a11	a12
3		A1	Na tor 1	1				1												1		1		1		1							
8	bz	A11	Na tor 1	1				1												1		1		1		1							
3		A2	Na tor 2	1						1										1		1						1					
8	bz	A21	Na tor 2	1						1										1		1						1					
3		A3	Na tor 3	1								1								1		1		1		1				1			
3		A4	Na tor 4	1										1						1		1						1					
3		A5	Na tor 5	1												1				1		1		1		1				1		1	
3		B1	Na tor 1			1		1										1						1		1							
8	bz	B11	Na tor 1			1		1										1						1		1							
3		B2	Na tor 2			1				1								1		1		1						1					
8	bz	B21	Na tor 2			1				1								1		1		1						1					
3		B3	Na tor 3			1						1						1						1		1				1			
3		B4	Na tor 4			1								1				1		1		1						1					
3		B5	Na tor 5			1										1		1						1		1				1		1	

gdzie:

ItA, ItB … – nazwa odcinka torowego,

Iz1, Iz2 … – nazwa odcinka zwrotnicowego,

a11 - w sekcji odcinków torowych i zwrotnicowych komórka itA– algorytm odcinka torowego A odpowiadający za stan odcinka torowego „niezajęty”,

„1” - w komórce odpowiada przypisaniu algorytmu do zadania.

Komórka pusta oznacza, że algorytm nie jest wykorzystywany w zadaniu/zadaniach.

Tak skonstruowana tablica przedstawia wszystkie możliwe sprawdzenia dostępne do zrealizowania na danym przykładowym posterunku. Puste komórki w tablicy oznaczają nie wykorzystywanie danego algorytmu, w modelu matematycznym wstawiane jest zero.

Poprzez określenie celu sprawdzeń, już na tym etapie można zawęzić zbiór testów do określonego elementu lub całej aplikacji poprzez usunięcie odpowiednich nie badanych elementów konfiguracji.

B. Ograniczenia

Tablicę sprawdzeń (rys. 5.4) można przedstawić jako macierz zmiennych $x_{i,j} \in \{0,1\}$. Są to współrzędne poszczególnych komórek algorytmów w sekcjach.

$$\begin{matrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2j} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3j} \\ & & \dots & & \\ x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} & \dots & x_{ij} \end{matrix} \tag{5.2}$$

Przykładowo w sekcji zwrotnicowej x_{13} odpowiada komórce z algorytmem a21 zwrotnicy 2 w przebiegu A1 na tor 1.

oraz macierz kosztów realizacji zadań $c_i \in \{1,n\}$:

$$\begin{matrix} c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_n \end{matrix} \tag{5.3}$$

Przykładowo koszt c_1 jest to koszt realizacji zadania A1, c_2 koszt realizacji zadania A11.

W algorytmie zastosowano następujące warunki:

- Sprawdzenie każdego algorytmu sterowania i kontroli jest realizowane co najmniej jeden raz.

Jest to istotne ograniczenie z punktu widzenia określenia stanu sprawności czy dostępności systemu. Aby mieć pełną informację o badanym obiekcie konieczne jest sprawdzenie wszystkich funkcji realizowanych przez system. Warunek polega na kontroli kolumn zawierających badane algorytmy w tabeli zadań:

$$\begin{gathered} x_{11} + x_{21} + x_{31} + \ldots + x_{i1} \geq 1 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + \ldots + x_{i2} \geq 1 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} + \ldots + x_{i3} \geq 1 \\ \ldots \\ x_{1j} + x_{2j} + x_{3j} + \ldots + x_{ij} \geq 1 \end{gathered} \tag{5.4}$$

$x_{i,j}$ – współrzędne poszczególnych komórek algorytmów w sekcjach.

- Nie każde sprawdzenie musi zostać użyte

Podczas badań nie istnieje potrzeba, aby wszystkie dostępne sprawdzenia zostały użyte. Każde sprawdzenie zawiera po kilka algorytmów, częściowo lub całkowicie się pokrywających, występujących w innych sprawdzeniach. Z całej puli sprawdzeń można wybrać kilka, których realizacja jest wystarczająca do kontroli stanu. Regułę tą opisać można zależnością:

$$\begin{gathered} x_{11} + x_{12} + x_{13} + \ldots + x_{1j} \geq 0 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + \ldots + x_{2j} \geq 0 \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} + \ldots + x_{3j} \geq 0 \\ \ldots \\ x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + \ldots + x_{ij} \geq 0 \end{gathered} \tag{5.5}$$

$x_{i,j}$ – współrzędne poszczególnych komórek algorytmów w sekcjach.

- Funkcja kryterium

Określona jako minimalny koszt realizacji zadania w stosunku do ilości badanych algorytmów zadaniem:

$$F(x,c) = \min \{C_1(x_{11}/na_1 + x_{12}/na_1 + x_{13}\ /na_1 + \ldots + x_{1j}/na_1) + \quad (5.6)$$
$$C_2(x_{21}/na_2 + x_{22}/na_2 + x_{23}\ /na_2 + \ldots + x_{2j}/na_2) +$$
$$C_3(x_{31}/na_3 + x_{32}/na_3 + x_{33}\ /na_3 + \ldots + x_{3j}/na_3) +$$
$$\ldots +$$
$$C_i(x_{i1}/na_i + x_{i2}/na_i + x_{i3}\ /na_i + \ldots + x_{ij}/na_i)\}$$

gdzie:
C_i – koszt realizacji i-tego zadania,
na_i – liczba badanych algorytmów w wierszu danym sprawdzeniem.
$x_{i,j}$ – współrzędne poszczególnych komórek algorytmów w sekcjach.

5.4 Przykład zastosowania metody wyznaczana testów

Niech będzie określona macierz zadań z określonymi kosztami ich wykonania. Należy wykonać testy sprawdzające poprawność realizacji funkcji przestawiania zwrotnic dla przykładowego układu torowego na stacji. Dysponując możliwymi jazdami spod semaforów wjazdowych A i B możliwe są jazdy na tor stacyjny 1, 2 i 4. Z całej dostępnej tablicy należy uwzględnić fragment zawierający elementy zwrotnicowe. Jest to już pierwszy etap minimalizacji zależny od celu sprawdzenia. W zadaniu określono zbadanie zwrotnic więc tablica zadań wygląda następująco:

		Przebieg / zadanie P		Algorytmy konfiguracji											
Koszt zadania			Opis	Zwrotnice Z											
C				1		2		3		4		5		6	
				a11	a12	a21	a22	a31	a32	a41	a42	a51	a52	a61	a62
3		A1	Na tor 1			1			1		1	1			
3		A2	Na tor 2			1		1						1	
3		A4	Na tor 4			1		1							1
3		B1	Na tor 1	1						1		1			
3		B2	Na tor 2		1		1	1						1	
10		B4	Na tor 4		1		1	1							1

Macierz algorytmów sterowania i kontroli przedstawia się następująco:

$$\begin{matrix} x_{13} & x_{16} & x_{18} & x_{19} \\ x_{23} & x_{25} & x_{211} & \\ x_{33} & x_{35} & x_{312} & \\ x_{41} & x_{47} & x_{49} & \\ x_{52} & x_{54} & x_{55} & x_{511} \\ x_{62} & x_{64} & x_{65} & x_{612} \end{matrix} \quad (5.7)$$

Wypisujemy współrzędne $x_{i,j}$ wszystkich wykorzystywanych algorytmów („1”):

- x_{13} odpowiada komórce z algorytmem a21 zwrotnicy 2 w przebiegu A1 na tor 1.
- x_{16} odpowiada komórce z algorytmem a32 zwrotnicy 3 w przebiegu A1 na tor 1.

Macierz kosztów dla każdego z wierszy:

Uogólniony koszt realizacji zadań przyjęty jest na podstawie założeń pkt 5.1.3. Nastawienie przebiegów wjazdowych nie wymaga symulacji stanu elementów badanego systemu oraz systemów powiązanych. Dlatego koszt wszystkich sprawdzeń jest taki sam - 3, ale na potrzeby wykazania realizacji funkcji celu wprowadzono w jednym zadaniu koszt 10.

$$3_1 \quad 3_2 \quad 3_3 \quad 3_4 \quad 3_5 \quad 10_6 \quad (5.8)$$

3_1 - koszt uogólniony wartości 3 zadania A1.

Stosując warunki:

- Sprawdzenie każdego algorytmu sterowania i kontroli co najmniej jeden raz, zatem:

$$\begin{matrix} x_{41} \geq 1 \\ x_{52} + x_{62} \geq 1 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} \geq 1 \\ x_{54} \quad x_{64} \geq 1 \\ x_{25} + x_{35} + x_{55} + x_{65} \geq 1 \\ x_{16} \geq 1 \\ x_{47} \geq 1 \\ x_{18} \geq 1 \\ x_{19} + x_{49} \geq 1 \\ x_{2\,11} + x_{5\,11} \geq 1 \\ x_{3\,12} + x_{6\,12} \geq 1 \end{matrix} \quad (5.9)$$

- Nie każde sprawdzenie musi zostać użyte, zatem:

$$x_{13} + x_{16} + x_{18} + x_{19} \geq 0 \quad (5.10)$$
$$x_{23} + x_{25} + x_{211} \geq 0$$
$$x_{33} + x_{35} + x_{312} \geq 0$$
$$x_{41} + x_{47} + x_{49} \geq 0$$
$$x_{52} + x_{54} + x_{55} + x_{511} \geq 0$$
$$x_{62} + x_{64} + x_{65} + x_{612} \geq 0$$

- Funkcja kryterium:

$$\begin{aligned} F(x,c) = \min \{ & 3\,(x_{13}/4 + x_{16}/4 + x_{18}/4 + x_{19}/4) + \\ & 3\,(x_{23}/3 + x_{25}/3 + x_{211}/3) + \\ & 3\,(x_{33}/3 + x_{35}/3 + x_{312}/3) + \\ & 3\,(x_{41}/3 + x_{47}/3 + x_{49}/3) + \\ & 3\,(x_{52}/4 + x_{54}/4 + x_{55}/4 + x_{511}/4) + \\ & 10\,(x_{62}/4 + x_{64}/4 + x_{65}/4 + x_{612}/4)\} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Poniżej przedstawiono autorski zapis programu, zmiennych, ograniczenia, funkcję kryterium oraz wyniki obliczeń. W tym celu wykorzystano oprogramowanie Mathematica (Mathematica – komercyjny system obliczeń symbolicznych i numerycznych opracowany w 1988 przez Stephena Wolframa. W ciągu swojego istnienia stał się popularny w środowisku naukowców i inżynierów. Mathematicę charakteryzują wysoka wydajność, szerokie możliwości wizualizacji i prezentacji danych oraz przenośność. Obecnie jest dostępna na większość platform 32- i 64-bitowych. Jest środowiskiem pracy, które pozwala na obliczenia od prostej arytmetyki po najbardziej zaawansowane obliczenia matematyki wyższej. Zakres procedur obliczeniowych pozwala na wykorzystywanie jej tak przez uczniów i studentów jak i pracowników naukowych, stosujących w pracach badawczych zaawansowany aparat matematyczny [79].

Zmienne x_{ij} są zapisywane w postaci współrzędnych, przykładowo x_{13} w środowisku Mathematica jest jako PA1Za21 (Przebieg A1 Zwrotnica 1 algorytm 21).

- Zapis funkcji celu:

```
Minimize {[3 * (PA1Za21 / 4 + PA1Za32 / 4 + PA1Za42 / 4 + PA1Za51 / 4) +
3 * (PA2Za21 / 3 + PA2Za31 / 3 + PA2Za61 / 3) +
3 * (PA4Za21 / 3 + PA4Za31 / 3 + PA4Za62 / 3) +
3 * (PB1Za11 / 3 + PB1Za41 / 3 + PB1Za51 / 3) +
3 * (PB2Za12 / 4 + PB2Za22 / 4 + PB2Za31 / 4 + PB2Za61 / 4) +
10 * (PB4Za12 / 4 + PB4Za22 / 4 + PB4Za31 / 4 + PB4Za62 / 4),
```

- Warunek sprawdzenia każdego algorytmu sterowania i kontroli co najmniej jeden raz:

```
PB1Za11 ≥ 1 &&
PB2Za12 + PB4Za12 ≥ 1 &&
PA1Za21 + PA2Za21 + PA4Za21 ≥ 1 &&
PB2Za22 + PB4Za22 ≥ 1 &&
PA2Za31 + PA4Za31 + PB2Za31 + PB4Za31 ≥ 1 &&
PA1Za32 ≥ 1 &&
PB1Za41 ≥ 1 &&
PA1Za42 ≥ 1 &&
PA1Za51 + PB1Za51 ≥ 1 &&
PA2Za61 + PB2Za61 ≥ 1 &&
PA4Za62 + PB4Za62 ≥ 1 &&


(PA1Za21 + PA1Za32 + PA1Za42 + PA1Za51 == 0 ||
PA1Za21 + PA1Za32 + PA1Za42 + PA1Za51 == 4) &&
(PA2Za21 + PA2Za31 + PA2Za61 == 0 || PA2Za21 + PA2Za31 + PA2Za61 == 3) &&
(PA4Za21 + PA4Za31 + PA4Za62 == 0 || PA4Za21 + PA4Za31 + PA4Za62 == 3) &&
(PB1Za11 + PB1Za41 + PB1Za51 == 0 || PB1Za11 + PB1Za41 + PB1Za51 == 3) &&
(PB2Za12 + PB2Za22 + PB2Za31 + PB2Za61 == 0 ||
PB2Za12 + PB2Za22 + PB2Za31 + PB2Za61 == 4) &&
(PB4Za12 + PB4Za22 + PB4Za31 + PB4Za62 == 0 ||
PB4Za12 + PB4Za22 + PB4Za31 + PB4Za62 == 4) &&


PA1Za21 ∈ Integers && PA1Za32 ∈ Integers && PA1Za42 ∈Integers && PA1Za51 ∈ Integers &&
PA2Za21 ∈ Integers && PA2Za31 ∈ Integers && PA2Za61 ∈ Integers && PA4Za21 ∈ Integers &&
PA4Za31 ∈ Integers && PA4Za62 ∈ Integers && PB1Za11 ∈ Integers && PB1Za41 ∈ Integers &&
PB1Za51 ∈ Integers && PB2Za12 ∈ Integers && PB2Za22 ∈ Integers && PB2Za31 ∈ Integers &&
PB2Za61 ∈ Integers && PB4Za12 ∈ Integers && PB4Za22 ∈ Integers && PB4Za31 ∈ Integers &&
PB4Za62 ∈ Integers &&
```

- Warunek nie każde sprawdzenie musi zostać użyte:

```
0 ≤ PA1Za21 ≤ 1 && 0 ≤ PA1Za32 ≤ 1 && 0 ≤ PA1Za42 ≤ 1 && 0 ≤ PA1Za51 ≤ 1 &&
0 ≤ PA2Za21 ≤ 1 && 0 ≤ PA2Za31 ≤ 1 && 0 ≤ PA2Za61 ≤ 1 &&
0 ≤ PA4Za21 ≤ 1 && 0 ≤ PA4Za31 ≤ 1 && 0 ≤ PA4Za62 ≤ 1 &&
0 ≤ PB1Za11 ≤ 1 && 0 ≤ PB1Za41 ≤ 1 && 0 ≤ PB1Za51 ≤ 1 &&
0 ≤ PB2Za12 ≤ 1 && 0 ≤ PB2Za22 ≤ 1 && 0 ≤ PB2Za31 ≤ 1 && 0 ≤ PB2Za61 ≤ 1 &&
0 ≤ PB4Za12 ≤ 1 && 0 ≤ PB4Za22 ≤ 1 && 0 ≤ PB4Za31 ≤ 1 && 0 ≤ PB4Za62 ≤ 1},

{PA1Za21, PA1Za32, PA1Za42, PA1Za51,
PA2Za21, PA2Za31, PA2Za61,
PA4Za21, PA4Za31, PA4Za62,
PB1Za11, PB1Za41, PB1Za51,
PB2Za12, PB2Za22, PB2Za31, PB2Za61,
PB4Za12, PB4Za22, PB4Za31, PB4Za62}]
```

- Dane wyjściowe:

```
Out[2]= {12, {PA1Za21 → 1, PA1Za32 → 1, PA1Za42 → 1, PA1Za51 → 1,
PA2Za21 → 0, PA2Za31 → 0, PA2Za61 → 0, PA4Za21 → 1, PA4Za31 → 1, PA4Za62 → 1,
PB1Za11 → 1, PB1Za41 → 1, PB1Za51 → 1, PB2Za12 → 1, PB2Za22 → 1, PB2Za31 → 1,
PB2Za61 → 1, PB4Za12 → 0, PB4Za22 → 0, PB4Za31 → 0, PB4Za62 → 0}}
```

12 – ogólny koszt realizacji wyznaczonego zbioru testów

„→ 1” oznaczenie algorytmów wybranych przez program

„→ 0” oznaczenie algorytmów nie wybranych przez program

Otrzymane dane wynikowe można przedstawić na tablicy zadań.

		Przebieg / zadanie P		Algorytmy konfiguracji											
Koszt zadania			Opis	Zwrotnice Z											
C				1		2		3		4		5		6	
				a11	a12	a21	a22	a31	a32	a41	a42	a51	a52	a61	a62
3		A1	Na tor 1			1			1		1	1			
3		A2	Na tor 2			1		1						1	
3		A4	Na tor 4			1		1							1
3		B1	Na tor 1	1						1		1			
3		B2	Na tor 2		1		1	1						1	
10		B4	Na tor 4		1		1	1							1

Komórki tablicy zakolorowane na niebiesko są to komórki wyznaczone programem („Out[2]”), a sprawdzić je można realizując dane sprawdzenie, w wierszu którego się znajdują. Aby uzyskać informacje o stanie funkcjonalnym algorytmów zwrotnicowych należy

zrealizować zadanie A1, A4, B1, B2. Nie ma konieczności realizować wszystkich zadań i jest to zatem optymalny zbiór zadań jaki należy zrealizować. Koszt realizacji wyznaczonego zbioru jest 12, jest to suma kosztów poszczególnych sprawdzeń. Koszt również wyznaczony jest programem. W celu oceny wyniku można wyliczyć efektywność, która będziemy rozumieć jako stosunek kosztów sprawdzeń wyznaczonych do kosztów wszystkich sprawdzeń (25). Efektywność jest na poziomie 0,48.

Jak widać są to wszystkie możliwe algorytmy przebadane wyznaczonymi zadaniami co można sprawdzić, że co najmniej jedna komórka w kolumnach została za znaczona kolorem niebieskim. Spełniono zatem warunek, że wszystkie algorytmy muszą zostać sprawdzone co najmniej jeden raz. Dodatkowo spełniony jest drugi warunek, że nie wszystkie zadania muszą zostać użyte.

W celu weryfikacji metody można wyznaczyć zbiór zadań ręcznie: Na początek wyznaczamy algorytmy, które w kolumnach występują pojedynczo. Jest to a11, a32, a41, a42. Zatem zadania A1, B1 są zadaniami niezbędnymi, koniecznymi do realizacji, gdyż jedynie ich realizacja da informacje o stanie funkcjonalnym tychże algorytmów. Mając te dwa zadania należy dodać kolejne uzupełniające informacje o reszcie algorytmów. Dodać można albo zestaw A2, B4, lub zestaw A4, B2. Oba dodatkowe zestawy uzupełnią nam brakujące informacje, lecz zestaw A4, B2 jest tańszy w realizacji i tenże został wygenerowany jako brakujący z uwzględnieniem funkcji celu – minimalnego kosztu realizacji zbioru zadań.

6 Weryfikacja metody wyznaczania testów funkcjonalnych urządzeń srk

6.1 Profilowanie zadania

Dla przykładowej głowicy stacji której układ torowy przedstawiono na rysunku 5.2 i tablicy zależności na rysunku 5.3 przedstawiającej możliwe przebiegi do realizacji na układzie torowym oraz tablicy zadań z rysunku 5.4 wyznaczyć zbiór sprawdzeń obejmujący:

- sprawdzenia poprawności algorytmów zwrotnicowych,
- sprawdzenia poprawności algorytmów semaforów,
- sprawdzenia poprawności algorytmów odcinków torowych i zwrotnicowych,

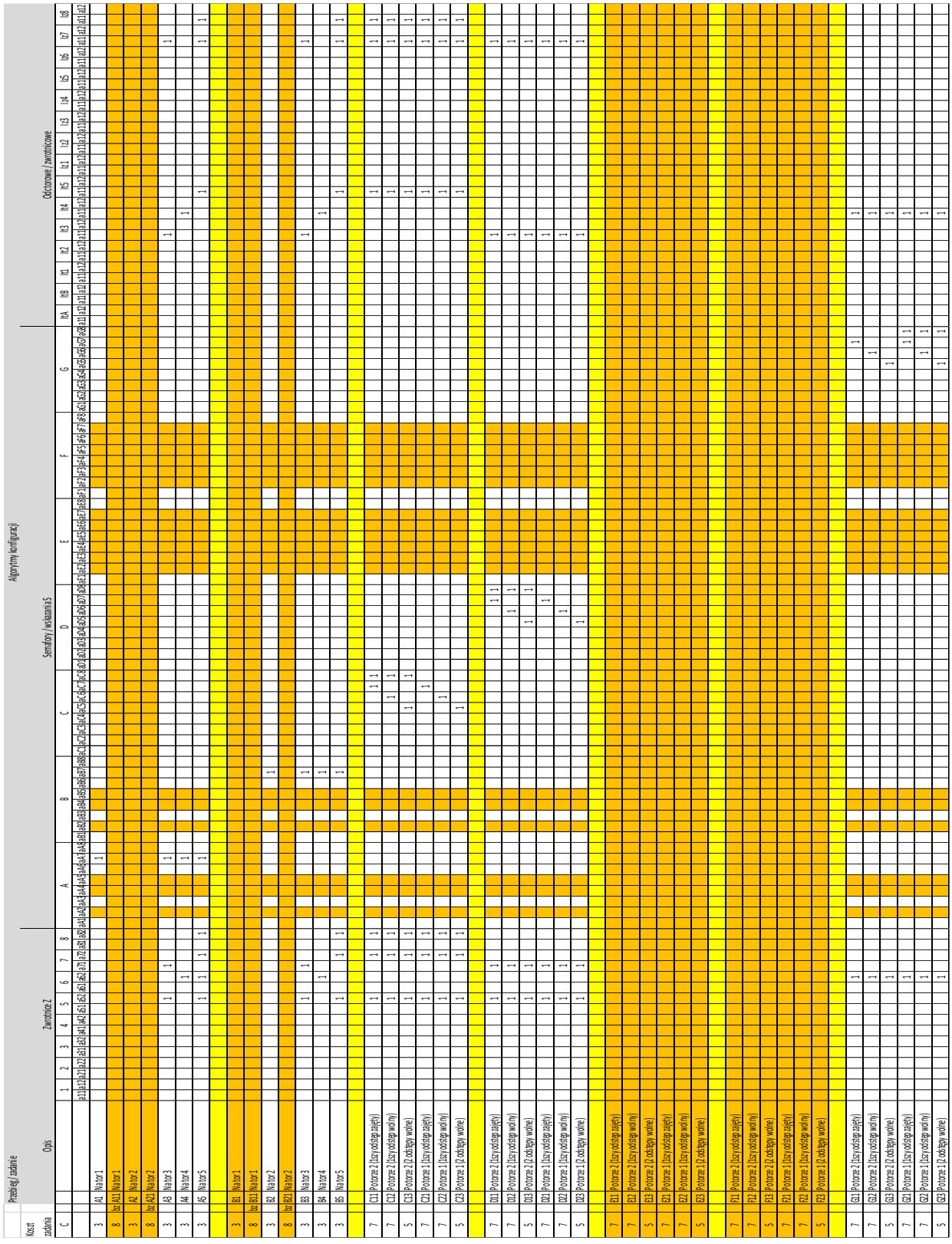
w odniesieniu do całej głowicy stacji (rys. 5.2).
Celem badań jest określenie poprawności realizacji wszystkich możliwych zadań - badanie dostępności funkcji.

Wyznaczenie zbiorów sprawdzeń można rozpocząć od wyznaczenia sprawdzeń niezbędnych wykorzystując tablicę zadań z rys. 5.4. Tablica z zaznaczanymi sprawdzeniami niezbędnymi przedstawiona jest na rysunek 6.1.

Zaznaczone na pomarańczowo komórki zawierające „1” i są to algorytmy sterowania i kontroli występujące tylko pojedynczych przebiegach A11, A2, A21, B1, B2, B21, wszystkie spod semafora E i F. Nazwy przebiegów są również zakolorowane na pomarańczowo. Algorytmy te nie są wykorzystywane w żadnych innych zadaniach więc są to sprawdzania niezbędne, które należy wykonać bez względu na koszt ich realizacji. Zmniejszamy przez to ilość algorytmów do sprawdzenia, tym bardziej, że nie wymagają one optymalizacji.

Algorytmy występujące w zadaniach niezbędnych można zatem wyzerować (usunąć) zarówno w wierszach jak i kolumnach ich występowania. Spowoduje to również usunięcie algorytmów z zadań nie będących sprawdzeniami niezbędnymi, gdyż ten algorytm będzie zbadany co najmniej sprawdzeniem niezbędnym. Otrzymujemy przez to znacznie zmniejszony (o usunięte sprawdzenia niezbędne) zbiór sprawdzeń dostępnych z których wyznaczamy pozostałe testy. W ten sposób pomniejszoną tabelę zadań przedstawiono na rysunku 6.2. Na pomarańczowo zakolorowano wiersze i kolumny, w których występują algorytmy występujące pojedynczo. Zakolorowane kolorem pomarańczowym wiersze i kolumny zostały wyzerowane.

Rys. 6.1 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi sprawdzeniami niezbędnymi



Rys. 6.2 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z usuniętymi sprawdzeniami niezbędnymi w wierszach i kolumnach

Z tak przygotowanej tablicy przedstawionej na rysunku 6.2. dokonujemy wyznaczenia zbioru testów, stosując ograniczenia pkt 2.1. Zapis w środowisku Mathematica jest następujący:

Wyznaczenie zbioru testów:

```
Minimize [(3 * (PA1ZaA7 /1) +
3 * (PA3Za52 / 5 + PA3Za71 / 5 + PA3ZaA7 / 5 + PA3ZIt3a11 / 5 + PA3ZIz7a11 / 5) +
3 * (PA4Za62 / 3 + PA4ZaA7 / 3 + PA4ZIt4a11 / 3) +
3 * (PA5Za52 / 8 + PA5Za62 / 8 + PA5Za72 / 8 + PA5Za82 / 8 +
PA5ZaA7 / 8 + PA5ZIt5a11 / 8 + PA5ZIz7a11 / 8 + PA5ZIz8a11 / 8) +
3 * (PB2ZaB7 / 1) +
3 * (PB3Za52 / 5 + PB3Za71 / 5 + PB3ZaB7 / 5 + PB3ZIt3a11 / 5 + PB3ZIz7a11 / 5) +
3 * (PB4Za62 / 3 + PB4ZaB7 / 3 + PB4ZIt4a11 / 3) +
3 * (PB5Za52 / 7 + PB5Za72 / 7 + PB5Za82 / 7 +
PB5ZaB7 / 7 + PB5ZIt5a11 / 7 + PB5ZIz7a11 / 7 + PB5ZIz8a11 / 7) +
7 * (PC11Za52 / 8 + PC11Za72 / 8 + PC11Za82 / 8 + PC11ZaC7 / 8 +
PC11ZaC8 / 8 + PC11ZIt5a11 / 8 + PC11ZIz7a11 / 8 + PC11ZIz8a11 / 8) +
7 * (PC12Za52 / 8 + PC12Za72 / 8 + PC12Za82 / 8 + PC12ZaC6 / 8 +
PC12ZaC8 / 8 + PC12ZIt5a11 / 8 + PC12ZIz7a11 / 8 + PC12ZIz8a11 / 8 ) +
5 * (PC13Za52 / 8 + PC13Za72 / 8 + PC13Za82 / 8 + PC13ZaC5 / 8 +
PC13ZaC8 / 8 + PC13ZIt5a11 / 8 + PC13ZIz7a11 / 8 + PC13ZIz8a11 / 8 ) +
7 * (PC21Za52 /7 + PC21Za72 / 7 + PC21Za82 / 7 + PC21ZaC7 / 7 +
PC21ZIt5a11 / 7 + PC21ZIz7a11 / 7 + PC21ZIz8a11 / 7 ) +
7 * (PC22Za52 / 7 + PC22Za72 / 7 + PC22Za82 / 7 + PC22ZaC6 / 7 +
PC22ZIt5a11 / 7 + PC22ZIz7a11 / 7 + PC22ZIz8a11 / 7 ),

PA3Za52 + PA5Za52 + PB3Za52 + PB5Za52 +
PC11Za52 + PC12Za52 + PC13Za52 + PC21Za52 + PC22Za52 ≥ 1 &&
PA4Za62 + PA5Za62 + PB4Za62 ≥ 1 &&
PA3Za71 + PB3Za71 ≥ 1 &&
PA5Za72 + PB5Za72 + PC11Za72 + PC12Za72 + PC13Za72 + PC21Za72 + PC22Za72 ≥ 1 &&
PA5Za82 + PB5Za82 + PC11Za82 + PC12Za82 + PC13Za82 + PC21Za82 + PC22Za82 ≥ 1 &&
PA1ZaA7 + PA3ZaA7 + PA4ZaA7 + PA5ZaA7 ≥ 1 &&
PB2ZaB7 + PB3ZaB7 + PB4ZaB7 + PB5ZaB7 ≥ 1 &&
PC11ZaC7 + PC21ZaC7 ≥ 1 &&
PC11ZaC8 + PC12ZaC8 + PC13ZaC8 ≥ 1 &&
PC12ZaC6 + PC22ZaC6 ≥ 1 &&
PC13ZaC5 ≥ 1 &&
```

```
PA3ZIt3a11 + PB3ZIt3a11 ≥ 1 &&
PA4ZIt4a11 + PB4ZIt4a11 ≥ 1 &&
PA5ZIt5a11 + PB5ZIt5a11 + PC11ZIt5a11 +
PC12ZIt5a11 + PC13ZIt5a11 + PC21ZIt5a11 + PC22ZIt5a11 ≥ 1 &&
PA3ZIz7a11 + PA5ZIz7a11 + PB3ZIz7a11 + PB5ZIz7a11 + PC11ZIz7a11 +
PC12ZIz7a11 + PC13ZIz7a11 + PC21ZIz7a11 + PC22ZIz7a11 ≥ 1 &&
PA5ZIz8a11 + PB5ZIz8a11 + PC11ZIz8a11 + PC12ZIz8a11 +
PC13ZIz8a11 + PC21ZIz8a11 + PC22ZIz8a11 ≥ 1 &&

(PA1ZaA7 == 0 || PA1ZaA7 == 1 ) &&
(PA3Za52 + PA3Za71 + PA3ZaA7 + PA3ZIt3a11 + PA3ZIz7a11 == 0 ||
PA3Za52 + PA3Za71 + PA3ZaA7 + PA3ZIt3a11 + PA3ZIz7a11 == 5 ) &&
(PA4Za62 + PA4ZaA7 + PA4ZIt4a11 == 0 || PA4Za62 + PA4ZaA7 + PA4ZIt4a11 == 3 ) &&
(PA5Za52 + PA5Za62 + PA5Za72 + PA5Za82 + PA5ZaA7 + PA5ZIt5a11 +
PA5ZIz7a11 + PA5ZIz8a11 == 0 || PA5Za52 + PA5Za62 + PA5Za72 + PA5Za82 + PA5ZaA7 +
PA5ZIt5a11 + PA5ZIz7a11 + PA5ZIz8a11 == 8 ) &&
(PB2ZaB7 == 0 || PB2ZaB7 == 1 ) &&
(PB3Za52 + PB3Za71 + PB3ZaB7 + PB3ZIt3a11 + PB3ZIz7a11 == 0 ||
PB3Za52 + PB3Za71 + PB3ZaB7 + PB3ZIt3a11 + PB3ZIz7a11 == 5 ) &&
(PB4Za62 + PB4ZaB7 + PB4ZIt4a11 == 0 || PB4Za62 + PB4ZaB7 + PB4ZIt4a11 == 3 ) &&
(PB5Za52 + PB5Za72 + PB5Za82 + PB5ZaB7 + PB5ZIt5a11 + PB5ZIz7a11 + PB5ZIz8a11 ==
0 || PB5Za52 + PB5Za72 + PB5Za82 + PB5ZaB7 +
PB5ZIt5a11 + PB5ZIz7a11 + PB5ZIz8a11 == 7 ) &&
(PC11Za52 + PC11Za72 + PC11Za82 + PC11ZaC7 + PC11ZaC8 + PC11ZIt5a11 +
PC11ZIz7a11 + PC11ZIz8a11 == 0 || PC11Za52 + PC11Za72 + PC11Za82 +
PC11ZaC7 + PC11ZaC8 + PC11ZIt5a11 + PC11ZIz7a11 + PC11ZIz8a11 == 8 ) &&
(PC12Za52 + PC12Za72 + PC12Za82 + PC12ZaC6 + PC12ZaC8 + PC12ZIt5a11 +
PC12ZIz7a11 + PC12ZIz8a11 == 0 || PC12Za52 + PC12Za72 + PC12Za82 +
PC12ZaC6 + PC12ZaC8 + PC12ZIt5a11 + PC12ZIz7a11 + PC12ZIz8a11 == 8 ) &&
(PC13Za52 + PC13Za72 + PC13Za82 + PC13ZaC5 + PC13ZaC8 + PC13ZIt5a11 +
PC13ZIz7a11 + PC13ZIz8a11 == 0 || PC13Za52 + PC13Za72 + PC13Za82 +
PC13ZaC5 + PC13ZaC8 + PC13ZIt5a11 + PC13ZIz7a11 + PC13ZIz8a11 == 8 ) &&
(PC21Za52 + PC21Za72 + PC21Za82 + PC21ZaC7 + PC21ZIt5a11 + PC21ZIz7a11 +
PC21ZIz8a11 == 0 || PC21Za52 + PC21Za72 + PC21Za82 +
PC21ZaC7 + PC21ZIt5a11 + PC21ZIz7a11 + PC21ZIz8a11 == 7 ) &&
(PC22Za52 + PC22Za72 + PC22Za82 + PC22ZaC6 + PC22ZIt5a11 + PC22ZIz7a11 +
PC22ZIz8a11 == 0 || PC22Za52 + PC22Za72 + PC22Za82 +
PC22ZaC6 + PC22ZIt5a11 + PC22ZIz7a11 + PC22ZIz8a11 == 7 ) &&
```

PA1ZaA7 ∈ Integers && PA3Za52 ∈ Integers && PA3Za71 ∈ Integers && PA3ZaA7 ∈ Integers &&
PA3ZIt3a11 ∈ Integers && PA3ZIz7a11 ∈ Integers && PA4Za62 ∈ Integers && PA4ZaA7 ∈
Integers && PA4ZIt4a11 ∈ Integers && PA5Za52 ∈ Integers && PA5Za62 ∈ Integers &&
PA5Za72 ∈ Integers && PA5Za82 ∈b Integers && PA5ZaA7 ∈ Integers && PA5ZIt5a11 ∈
Integers && PA5ZIz7a11 ∈ Integers && PA5ZIz8a11 ∈ Integers && PB2ZaB7 ∈ Integers &&
PB3Za52 ∈ Integers && PB3Za71 ∈ Integers && PB3ZaB7 ∈ Integers && PB3ZIt3a11 ∈
Integers && PB3ZIz7a11 ∈ Integers &&nPB4Za62 ∈ Integers && PB4ZaB7 ∈nIntegers &&
PB4ZIt4a11 ∈ Integers && PB5Za52 ∈ Integers && PB5Za72 ∈ Integers && PB5Za82 ∈ Integers
&& PB5ZaB7 ∈ Integers && PB5ZIt5a11 ∈ Integers && PB5ZIz7a11 ∈ Integers && PB5ZIz8a11 ∈
Integers && PC11Za52 ∈ Integers && PC11Za72 ∈ Integers && PC11Za82 ∈ Integers && PC11ZaC7
∈ Integers && PC11ZaC8 ∈ Integers && PC11ZIt5a11 ∈ Integers && PC11ZIz7a11 ∈ Integers &&
PC11ZIz8a11 ∈ Integers && PC12Za52 ∈ Integers && PC12Za72 ∈ Integers && PC12Za82 ∈
Integers && PC12ZaC6 ∈ Integers && PC12ZaC8 ∈ Integers && PC12ZIt5a11 ∈ Integers &&
PC12ZIz7a11 ∈ Integers && PC12ZIz8a11 ∈ Integers && PC13Za52 ∈ Integers && PC13Za72 ∈
Integers && PC13Za82 ∈ Integers && PC13ZaC5 ∈ Integers && PC13ZaC8 ∈ Integers &&
PC13ZIt5a11 ∈ Integers && PC13ZIz7a11 ∈ Integers && PC13ZIz8a11 ∈ Integers && PC21Za52 ∈
Integers && PC21Za72 ∈ Integers && PC21Za82 ∈ Integers && PC21ZaC7 ∈ Integers &&
PC21ZIt5a11 ∈ Integers && PC21ZIz7a11 ∈ Integers && PC21ZIz8a11 ∈ Integers && PC22Za52 ∈
Integers && PC22Za72 ∈ Integers && PC22Za82 ∈ Integers && PC22ZaC6 ∈ Integers &&
PC22ZIt5a11 ∈ Integers && PC22ZIz7a11 ∈ Integers && PC22ZIz8a11 ∈ Integers &&

0 ≤ PA1ZaA7 ≤ 1 &&
0 ≤ PA3Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PA3Za71 ≤ 1 &&
0 ≤ PA3ZaA7 ≤ 1 && 0 ≤ PA3ZIt3a11 ≤ 1 && 0 ≤ PA3ZIz7a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PA4Za62 ≤ 1 && 0 ≤ PA4ZaA7 ≤ 1 && 0 ≤ PA4ZIt4a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PA5Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PA5Za62 ≤ 1 && 0 ≤ PA5Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PA5Za82 ≤ 1 &&
0 ≤ PA5ZaA7 ≤ 1 && 0 ≤ PA5ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PA5ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PA5ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PB2ZaB7 ≤ 1 &&
0 ≤ PB3Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PB3Za71 ≤ 1 &&
0 ≤ PB3ZaB7 ≤ 1 && 0 ≤ PB3ZIt3a11 ≤ 1 && 0 ≤ PB3ZIz7a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PB4Za62 ≤ 1 && 0 ≤ PB4ZaB7 ≤ 1 && 0 ≤ PB4ZIt4a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PB5Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PB5Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PB5Za82 ≤ 1 && 0 ≤ PB5ZaB7 ≤ 1 &&
0 ≤ PB5ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PB5ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PB5ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PC11Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PC11Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PC11Za82 ≤ 1 && 0 ≤ PC11ZaC7 ≤ 1 &&
0 ≤ PC11ZaC8 ≤ 1 && 0 ≤ PC11ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC11ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC11ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PC12Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PC12Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PC12Za82 ≤ 1 && 0 ≤ PC12ZaC6 ≤ 1 &&
0 ≤ PC12ZaC8 ≤ 1 && 0 ≤ PC12ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC12ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC12ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PC13Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PC13Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PC13Za82 ≤ 1 && 0 ≤ PC13ZaC5 ≤ 1 &&
0 ≤ PC13ZaC8 ≤ 1 && 0 ≤ PC13ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC13ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC13ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PC21Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PC21Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PC21Za82 ≤ 1 && 0 ≤ PC21ZaC7 ≤ 1 &&
0 ≤ PC21ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC21ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC21ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PC22Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PC22Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PC22Za82 ≤ 1 && 0 ≤ PC22ZaC6 ≤ 1 &&
0 ≤ PC22ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC22ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC22ZIz8a11 ≤ 1},

{PA1ZaA7,
PA3Za52, PA3Za71, PA3ZaA7, PA3ZIt3a11, PA3ZIz7a11,
PA4Za62, PA4ZaA7, PA4ZIt4a11,
PA5Za52, PA5Za62, PA5Za72, PA5Za82, PA5ZaA7, PA5ZIt5a11, PA5ZIz7a11, PA5ZIz8a11,
PB2ZaB7,
PB3Za52, PB3Za71, PB3ZaB7, PB3ZIt3a11, PB3ZIz7a11,
PB4Za62, PB4ZaB7, PB4ZIt4a11,
PB5Za52, PB5Za72, PB5Za82, PB5ZaB7, PB5ZIt5a11, PB5ZIz7a11, PB5ZIz8a11,
PC11Za52, PC11Za72, PC11Za82, PC11ZaC7,
PC11ZaC8, PC11ZIt5a11, PC11ZIz7a11, PC11ZIz8a11,
PC12Za52, PC12Za72, PC12Za82, PC12ZaC6, PC12ZaC8,
PC12ZIt5a11, PC12ZIz7a11, PC12ZIz8a11,

```
PC13Za52, PC13Za72, PC13Za82, PC13ZaC5, PC13ZaC8,
PC13ZIt5a11, PC13ZIz7a11, PC13ZIz8a11,
PC21Za52, PC21Za72, PC21Za82, PC21ZaC7, PC21ZIt5a11, PC21ZIz7a11, PC21ZIz8a11,
PC22Za52, PC22Za72, PC22Za82, PC22ZaC6, PC22ZIt5a11, PC22ZIz7a11, PC22ZIz8a11}]
```

```
Out[1]= {25, {PA1ZaA7 → 0, PA3Za52 → 0, PA3Za71 → 0, PA3ZaA7 → 0, PA3ZIt3a11 → 0,
PA3ZIz7a11 → 0, PA4Za62 → 1, PA4ZaA7 → 1, PA4ZIt4a11 → 1, PA5Za52 → 0, PA5Za62 →
0, PA5Za72 → 0, PA5Za82 → 0, PA5ZaA7 → 0, PA5ZIt5a11 → 0, PA5ZIz7a11 → 0,
PA5ZIz8a11 → 0, PB2ZaB7 → 0, PB3Za52 → 1, PB3Za71 → 1, PB3ZaB7 → 1, PB3ZIt3a11 →
1, PB3ZIz7a11 → 1, PB4Za62 → 0, PB4ZaB7 → 0, PB4ZIt4a11 → 0, PB5Za52 → 0, PB5Za72
→ 0, PB5Za82 → 0, PB5ZaB7 → 0, PB5ZIt5a11 → 0, PB5ZIz7a11 → 0, PB5ZIz8a11 → 0,
PC11Za52 → 0, PC11Za72 → 0,
PC11Za82 → 0, PC11ZaC7 → 0, PC11ZaC8 → 0, PC11ZIt5a11 → 0, PC11ZIz7a11 → 0,
PC11ZIz8a11 → 0, PC12Za52 → 0, PC12Za72 → 0, PC12Za82 → 0, PC12ZaC6 → 0, PC12ZaC8
→ 0,
PC12ZIt5a11 → 0, PC12ZIz7a11 → 0, PC12ZIz8a11 → 0, PC13Za52 → 1, PC13Za72 → 1,
PC13Za82 → 1, PC13ZaC5 → 1, PC13ZaC8 → 1, PC13ZIt5a11 → 1, PC13ZIz7a11 → 1,
PC13ZIz8a11 → 1, PC21Za52 → 1, PC21Za72 → 1, PC21Za82 → 1, PC21ZaC7 → 1,
PC21ZIt5a11 → 1, PC21ZIz7a11 → 1, PC21ZIz8a11 → 1, PC22Za52 → 1, PC22Za72 → 1,
PC22Za82 → 1, PC22ZaC6 → 1, PC22ZIt5a11 → 1, PC22ZIz7a11 → 1, PC22ZIz8a11 → 1}}
```

Otrzymane dane wynikowe można przedstawić na tablicy zadań. Zakolorowane komórki na zielono są elementami wyznaczonymi przez program, wiersze z nazwą przebiegu zakolorowane na niebiesko (A4, B3, C13, C21, C22) są to przebiegi realizujące wyznaczone algorytmy – zadania sprawdzające. Koszt wyznaczonych sprawdzeń – 25. Tabelę z zaznaczonymi na niebiesko zadaniami wyznaczonymi programem przedstawia rysunek 6.3. Ponadto trzeba pamiętać o zadaniach niezbędnych wcześniej wyznaczonych – A11, A2, 21, B1, B11, B21, E i F, których koszt wynosi 114. Sumaryczny koszt sprawdzeń wynosi 139.

Przy koszcie realizacji wszystkich zadań 252 efektywność wynosi 0,55.

Rys. 6.3 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli całej aplikacji

6.2 Wyznaczenie zbioru sprawdzeń dla kontroli poprawności algorytmów zwrotnicowych

Wyznaczenie zbioru dla kontroli zwrotnic wykonuje się analogicznie jak dla całości aplikacji. Jest to sprawdzenie celowe i zawęża się przez to elementy do kontroli.

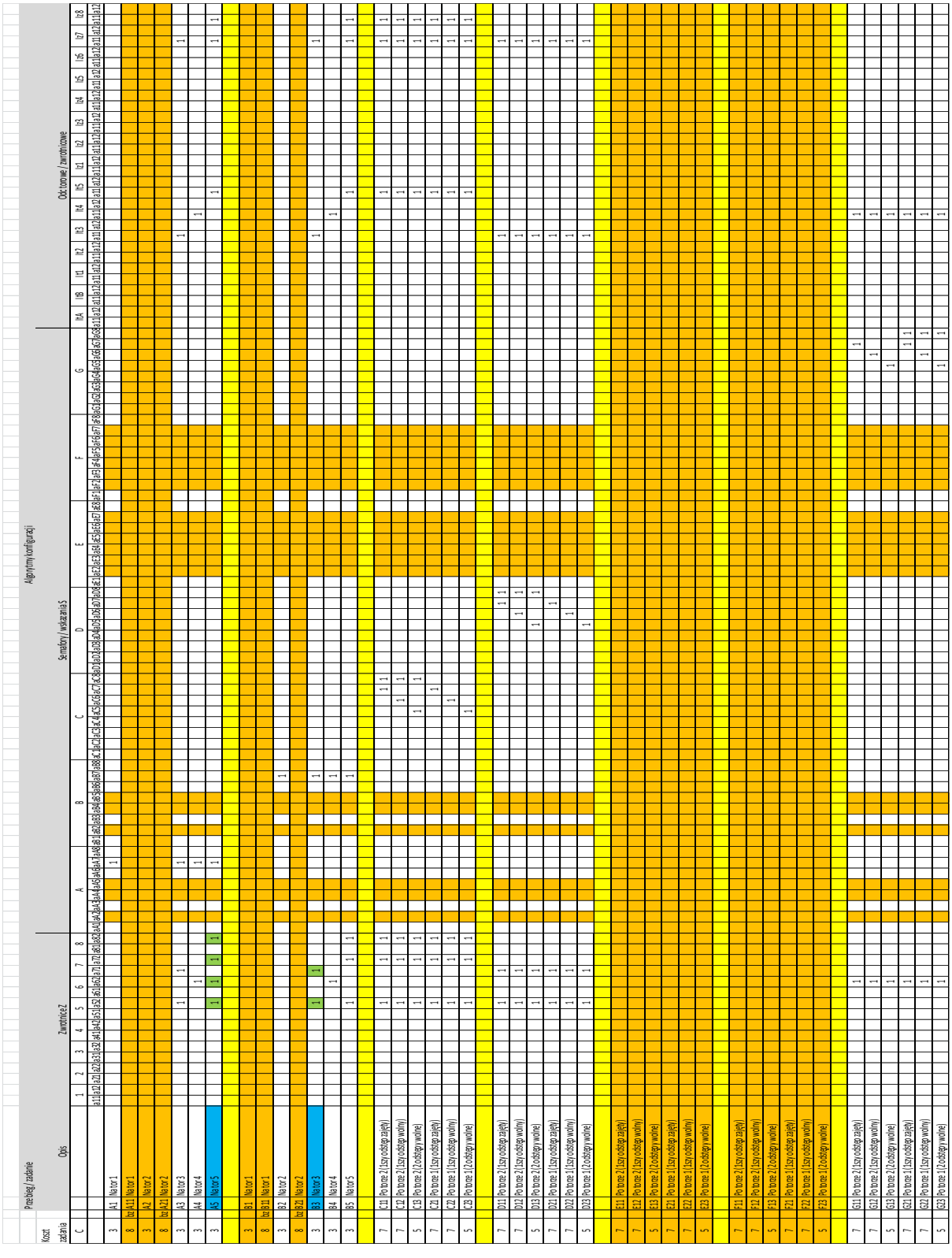
Zapis w środowisku Mathematica:

```
Minimize[{3 * (PA3Za52 / 2 + PA3Za71 / 2) +
3 * (PA4Za62 / 1) +
3 * (PA5Za52 / 4 + PA5Za62 / 4 + PA5Za72 / 4 + PA5Za82 / 4) +
3 * (PB3Za52 / 2 + PB3Za71 / 2) +
3 * (PB4Za62 / 1) +
3 * (PB5Za52 / 3 + PB5Za72 / 3 + PB5Za82 / 3) +
5 * (PC13Za52 / 3 + PC13Za72 / 3 + PC13Za82 / 3 ) +
5 * (PD13Za52 / 2 + PD13Za71 / 2 ) +
5 * (PG13Za62 / 1 ),

PA3Za52 + PA5Za52 + PB3Za52 + PB5Za52 + PC13Za52 + PD13Za52 ≥ 1 &&
PA4Za62 + PA5Za62 + PB4Za62 + PG13Za62 ≥ 1 &&
PA3Za71 + PB3Za71 + PD13Za71 ≥ 1 &&
PA5Za72 + PB5Za72 + PC13Za72 ≥ 1 &&
PA5Za82 + PB5Za82 + PC13Za82 ≥ 1 &&

(PA3Za52 + PA3Za71 == 0 || PA3Za52 + PA3Za71 == 2 ) &&
(PA4Za62 == 0 || PA4Za62 == 1 ) &&
(PA5Za52 + PA5Za62 + PA5Za72 + PA5Za82 == 0 ||
PA5Za52 + PA5Za62 + PA5Za72 + PA5Za82 == 4 ) &&
(PB3Za52 + PB3Za71 == 0 || PB3Za52 + PB3Za71 == 2 ) &&
(PB4Za62 == 0 || PB4Za62 == 1 ) &&
(PB5Za52 + PB5Za72 + PB5Za82 == 0 || PB5Za52 + PB5Za72 + PB5Za82 == 3 ) &&
(PC13Za52 + PC13Za72 + PC13Za82 == 0 || PC13Za52 + PC13Za72 + PC13Za82 == 3 ) &&
(PD13Za52 + PD13Za71 == 0 || PD13Za52 + PD13Za71 == 2 ) &&
(PG13Za62 == 0 || PG13Za62 == 1 ) &&

PA3Za52 ∈ Integers && PA3Za71 ∈ Integers && PA4Za62 ∈ Integers && PA5Za52 ∈ Integers &&
PA5Za62 ∈ Integers && PA5Za72 ∈ Integers && PA5Za82 ∈ Integers && PB3Za52 ∈
Integers && PB3Za71 ∈ Integers && PB4Za62 ∈ Integers && PB5Za52 ∈ Integers && PB5Za72 ∈
Integers && PB5Za82 ∈ Integers && PC13Za52 ∈ Integers && PC13Za72 ∈ Integers && PC13Za82
∈ Integers && PD13Za52 ∈ Integers && PD13Za71 ∈ Integers && PG13Za62 ∈ Integers &&

0 ≤ PA3Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PA3Za71 ≤ 1 &&0 ≤ PA4Za62 ≤ 1 &&
0 ≤ PA5Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PA5Za62 ≤ 1 && 0 ≤ PA5Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PA5Za82 ≤ 1 &&
```

```
0 ≤ PB3Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PB3Za71 ≤ 1 &&
0 ≤ PB4Za62 ≤ 1 &&
0 ≤ PB5Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PB5Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PB5Za82 ≤ 1 &&
0 ≤ PC13Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PC13Za72 ≤ 1 && 0 ≤ PC13Za82 ≤ 1 &&
0 ≤ PD13Za52 ≤ 1 && 0 ≤ PD13Za71 ≤ 1 &&
0 ≤ PG13Za62 ≤ 1},


{PA3Za52, PA3Za71,
PA4Za62,
PA5Za52, PA5Za62, PA5Za72, PA5Za82,
PB3Za52, PB3Za71,
PB4Za62,
PB5Za52, PB5Za72, PB5Za82,
PC13Za52, PC13Za72, PC13Za82,
PD13Za52, PD13Za71,
PG13Za62}]
```

```
Out[1]= {6, {PA3Za52 → 0, PA3Za71 → 0, PA4Za62 → 0, PA5Za52 → 1, PA5Za62 → 1, PA5Za72
→ 1, PA5Za82 → 1, PB3Za52 → 1, PB3Za71 → 1, PB4Za62 → 0, PB5Za52 → 0, PB5Za72 →
0, PB5Za82 → 0, PC13Za52 → 0, PC13Za72 → 0, PC13Za82 → 0, PD13Za52 → 0, PD13Za71 →
0, PG13Za62 → 0}}
```

Wyniki zaznaczono na rysunku 6.4. Zakolorowane komórki na zielono są elementami wyznaczonymi przez program, wiersze z nazwą przebiegu zakolorowane na niebiesko (A5, B3) są to przebiegi realizujące wyznaczone algorytmy – zadania sprawdzające. Koszt wyznaczonych sprawdzeń wynosi 6. Ponadto trzeba pamiętać o zadaniach niezbędnych wcześniej wyznaczonych – A11, A2, 21, B1, B11, B21, E i F (koszt 114). Sumaryczny koszt sprawdzeń 120. Efektywność 0,47



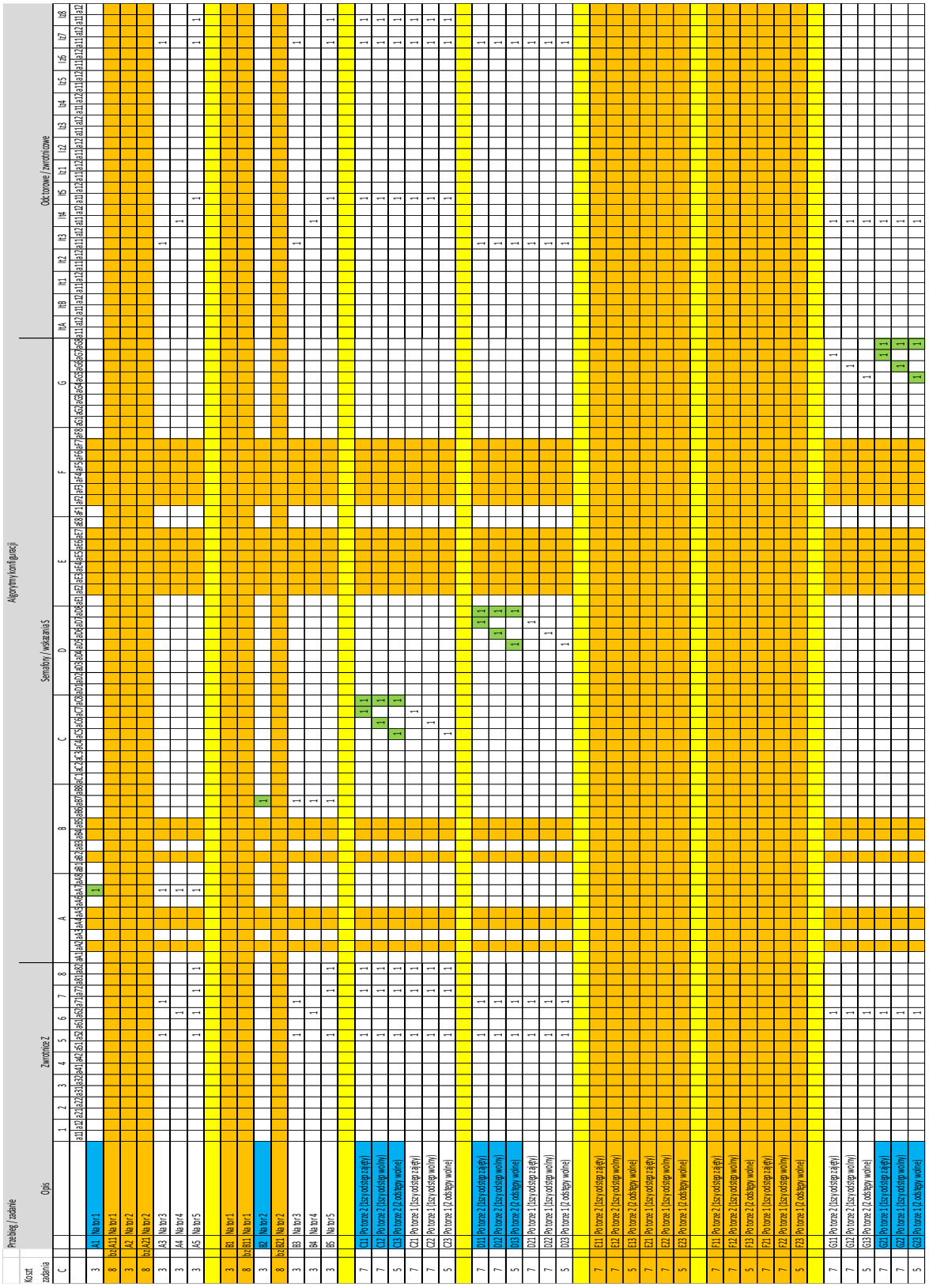
Rys. 6.4 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli algorytmów zwrotnicowych.

6.3 Wyznaczenie zbioru sprawdzeń dla kontroli poprawności algorytmów semaforów

```
Minimize{{3 * (PA1ZaA7 / 1) +
3 * (PB2ZaB7 / 1 ) +
7 * (PC11ZaC7 / 2 + PC11ZaC8 / 2 ) +
7 * (PC12ZaC6 / 2 + PC12ZaC8 / 2 ) +
5 * (PC13ZaC5 / 2 + PC13ZaC8 / 2 ) +
7 * (PD11ZaD7 / 2 + PD11ZaD8 / 2 ) +
7 * (PD12ZaD6 / 2 + PD12ZaD8 / 2 ) +
5 * (PD13ZaD5 / 2 + PD13ZaD8 / 2 ) +
7 * (PG21ZaG7 / 2 + PG21ZaG8 / 2 ) +
5 * (PG22ZaG6 / 2 + PG22ZaG8 / 2 ) +
5 * (PG23ZaG5 / 2 + PG23ZaG8 / 2 ),


PA1ZaA7 ≥ 1 &&
PB2ZaB7 ≥ 1 &&
PC13ZaC5 ≥ 1 &&
PC12ZaC6 ≥ 1 &&
PC11ZaC7 ≥ 1 &&
PC11ZaC8 + PC12ZaC8 + PC13ZaC8 ≥ 1 &&
PD13ZaD5 ≥ 1 &&
PD12ZaD6 ≥ 1 &&
PD11ZaD7 ≥ 1 &&
PD11ZaD8 + PD12ZaD8 + PD13ZaD8 ≥ 1 &&
PG23ZaG5 ≥ 1 &&
PG22ZaG6 ≥ 1 &&
PG21ZaG7 ≥ 1 &&
PG21ZaG8 + PG22ZaG8 + PG23ZaG8 ≥ 1 &&


(PA1ZaA7 == 0 || PA1ZaA7 == 1 ) &&
(PB2ZaB7 == 0 || PB2ZaB7 == 1 ) &&
(PC11ZaC7 + PC11ZaC8 == 0 || PC11ZaC7 + PC11ZaC8 == 2 ) &&
(PC12ZaC6 + PC12ZaC8 == 0 || PC12ZaC6 + PC12ZaC8 == 2 ) &&
(PC13ZaC5 + PC13ZaC8 == 0 || PC13ZaC5 + PC13ZaC8 == 2 ) &&
(PD11ZaD7 + PD11ZaD8 == 0 || PD11ZaD7 + PD11ZaD8 == 2 ) &&
(PD12ZaD6 + PD12ZaD8 == 0 || PD12ZaD6 + PD12ZaD8 == 2 ) &&
(PD13ZaD5 + PD13ZaD8 == 0 || PD13ZaD5 + PD13ZaD8 == 2 ) &&
(PG21ZaG7 + PG21ZaG8 == 0 || PG21ZaG7 + PG21ZaG8 == 2 ) &&
(PG22ZaG6 + PG22ZaG8 == 0 || PG22ZaG6 + PG22ZaG8 == 2 ) &&
(PG23ZaG5 + PG23ZaG8 == 0 || PG23ZaG5 + PG23ZaG8 == 2 ) &&
```

```
PA1ZaA7 ∈ Integers && PB2ZaB7 ∈ Integers && PC11ZaC7 ∈ Integers && PC11ZaC8 ∈ Integers &&
PC12ZaC6 ∈ Integers && PC12ZaC8 ∈ Integers && PC13ZaC5 ∈ Integers && PC13ZaC8 ∈ Integers
&& PD11ZaD7 ∈ Integers && PD11ZaD8 ∈ Integers && PD12ZaD6 ∈ Integers && PD12ZaD8 ∈
Integers && PD13ZaD5 ∈ Integers && PD13ZaD8 ∈ Integers && PG21ZaG7 ∈ Integers && PG21ZaG8
∈ Integers && PG22ZaG6 ∈ Integers && PG22ZaG8 ∈ Integers && PG23ZaG5 ∈ Integers &&
PG23ZaG8 ∈ Integers &&

0 ≤ PA1ZaA7 ≤ 1 &&
0 ≤ PB2ZaB7 ≤ 1 &&
0 ≤ PC11ZaC7 ≤ 1 && 0 ≤ PC11ZaC8 ≤ 1 &&
0 ≤ PC12ZaC6 ≤ 1 && 0 ≤ PC12ZaC8 ≤ 1 &&
0 ≤ PC13ZaC5 ≤ 1 && 0 ≤ PC13ZaC8 ≤ 1 &&
0 ≤ PD11ZaD7 ≤ 1 && 0 ≤ PD11ZaD8 ≤ 1 &&
0 ≤ PD12ZaD6 ≤ 1 && 0 ≤ PD12ZaD8 ≤ 1 &&
0 ≤ PD13ZaD5 ≤ 1 && 0 ≤ PD13ZaD8 ≤ 1 &&
0 ≤ PG21ZaG7 ≤ 1 && 0 ≤ PG21ZaG8 ≤ 1 &&
0 ≤ PG22ZaG6 ≤ 1 && 0 ≤ PG22ZaG8 ≤ 1 &&
0 ≤ PG23ZaG5 ≤ 1 && 0 ≤ PG23ZaG8 ≤ 1},

{PA1ZaA7,
PB2ZaB7,
PC11ZaC7, PC11ZaC8,
PC12ZaC6, PC12ZaC8,
PC13ZaC5, PC13ZaC8,
PD11ZaD7, PD11ZaD8,
PD12ZaD6, PD12ZaD8,
PD13ZaD5, PD13ZaD8,
PG21ZaG7, PG21ZaG8,
PG22ZaG6, PG22ZaG8,
PG23ZaG5, PG23ZaG8}]

Out[ · ]= {63, {PA1ZaA7 → 1, PB2ZaB7 → 1, PC11ZaC7 → 1, PC11ZaC8 → 1, PC12ZaC6 → 1,
PC12ZaC8 → 1, PC13ZaC5 → 1, PC13ZaC8 → 1, PD11ZaD7 → 1, PD11ZaD8 → 1,
PD12ZaD6 → 1, PD12ZaD8 → 1, PD13ZaD5 → 1, PD13ZaD8 → 1, PG21ZaG7 → 1,
PG21ZaG8 → 1, PG22ZaG6 → 1, PG22ZaG8 → 1, PG23ZaG5 → 1, PG23ZaG8 → 1}}
```

Wyniki przedstawiono na rysunku 6.5. Zakolorowane komórki na zielono są elementami wyznaczonymi przez program, wiersze z nazwą przebiegu zakolorowane na niebiesko (A1, B2, C11, C12, C13, D11, D12, D13, G21, G22, G23) są to przebiegi realizujące wyznaczone algorytmy – zadania sprawdzające, koszt 63. Ponadto trzeba pamiętać o zadaniach niezbędnych wcześniej wyznaczonych – A11, A2, 21, B1, B11,B21, E i F (koszt 114). Sumaryczny koszt 177, efektywność 0,70.



Rys. 6.5 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli algorytmów semaforów

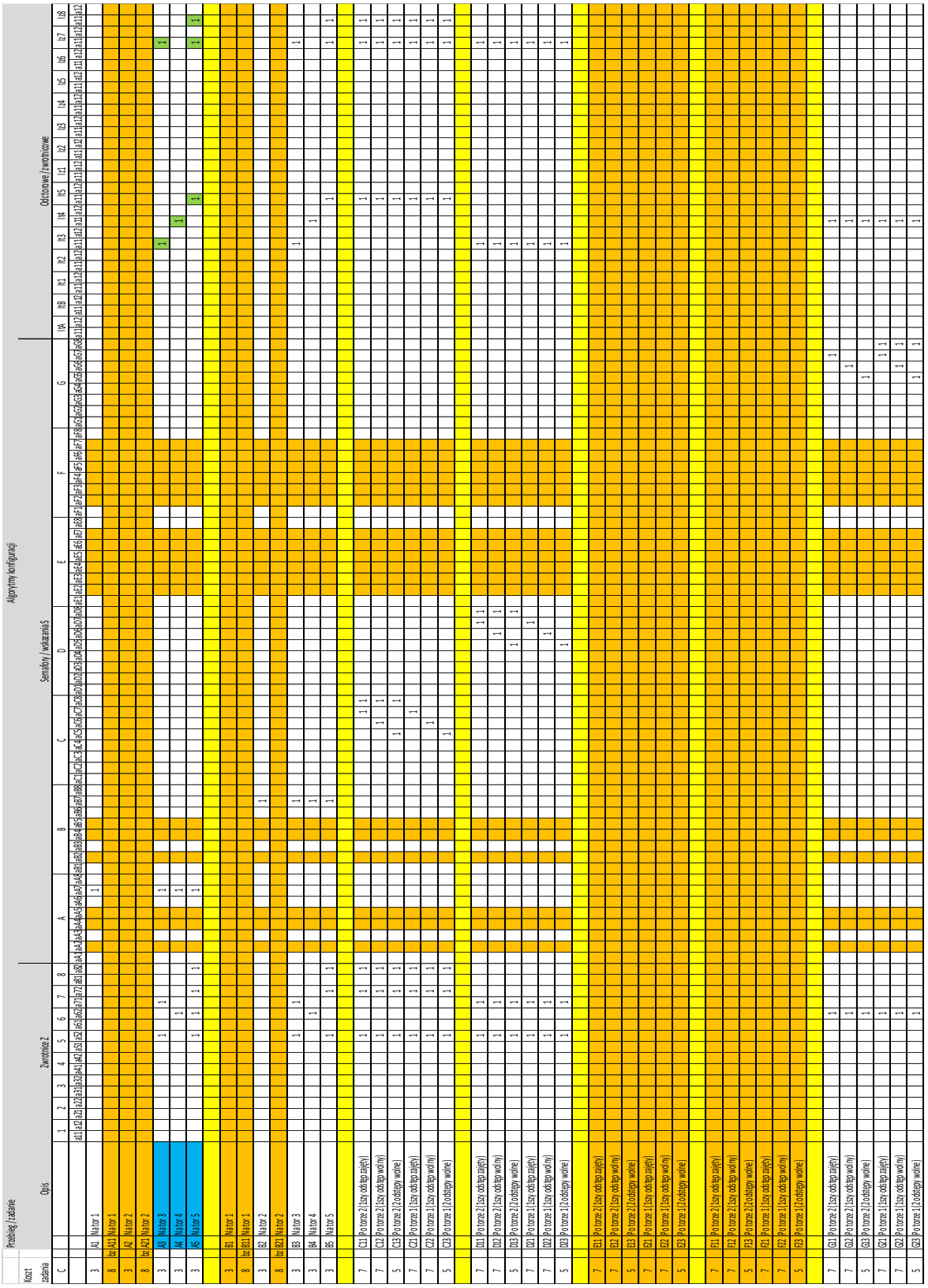
6.4 Wyznaczenie zbioru sprawdzeń dla kontroli poprawności algorytmów odcinków torowych i zwrotnicowych

```
Minimize [{3 * (PA3ZIt3a11 / 2 + PA3ZIz7a11 / 2) +
3 * (PA4ZIt4a11 / 1) +
3 * (PA5ZIt5a11 / 3 + PA5ZIz7a11 / 3 + PA5ZIz8a11 / 3) +
5 * (PC13ZIt5a11 / 3 + PC13ZIz7a11 / 3 + PC13ZIz8a11 / 3) +
5 * (PD13ZIt3a11 / 2 + PD13ZIz7a11 / 2) +
5 * (PG13ZIt4a11 / 1),

PA3ZIt3a11 + PD13ZIt3a11 ≥ 1 &&
PA4ZIt4a11 + PG13ZIt4a11 ≥ 1 &&
PA5ZIt5a11 + PC13ZIt5a11 ≥ 1 &&
PA3ZIz7a11 + PA5ZIz7a11 + PC13ZIz7a11 + PD13ZIz7a11 ≥ 1 &&
PA5ZIz8a11 + PC13ZIz8a11 ≥ 1 &&

(PA3ZIt3a11 + PA3ZIz7a11 == 0 || PA3ZIt3a11 + PA3ZIz7a11 == 2 ) &&
(PA4ZIt4a11 == 0 || PA4ZIt4a11 == 1 ) &&
(PA5ZIt5a11 + PA5ZIz7a11 + PA5ZIz8a11 == 0 ||
PA5ZIt5a11 + PA5ZIz7a11 + PA5ZIz8a11 == 3) &&
(PC13ZIt5a11 + PC13ZIz7a11 + PC13ZIz8a11 == 0 ||
PC13ZIt5a11 + PC13ZIz7a11 + PC13ZIz8a11 == 3 ) &&
(PD13ZIt3a11 + PD13ZIz7a11 == 0 || PD13ZIt3a11 + PD13ZIz7a11 == 2 ) &&
(PG13ZIt4a11 == 0 || PG13ZIt4a11 == 1 ) &&

PA3ZIt3a11 ∈
zbiór liczb całkowitych
Integers && PA3ZIz7a11 ∈ Integers && PA4ZIt4a11 ∈ Integers && PA5ZIt5a11 ∈ Integers &&
PA5ZIz7a11 ∈ Integers && PA5ZIz8a11 ∈ Integers && PC13ZIt5a11 ∈ Integers && PC13ZIz7a11
∈ Integers && PC13ZIz8a11 ∈ Integers && PD13ZIt3a11 ∈ Integers && PD13ZIz7a11 ∈ Integers
&& PG13ZIt4a11 ∈ Integers &&

0 ≤ PA3ZIt3a11 ≤ 1 && 0 ≤ PA3ZIz7a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PA4ZIt4a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PA5ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PA5ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PA5ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PC13ZIt5a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC13ZIz7a11 ≤ 1 && 0 ≤ PC13ZIz8a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PD13ZIt3a11 ≤ 1 && 0 ≤ PD13ZIz7a11 ≤ 1 &&
0 ≤ PG13ZIt4a11 ≤ 1},

{PA3ZIt3a11, PA3ZIz7a11,
PA4ZIt4a11,
PA5ZIt5a11, PA5ZIz7a11, PA5ZIz8a11,
PC13ZIt5a11, PC13ZIz7a11, PC13ZIz8a11,
PD13ZIt3a11, PD13ZIz7a11,
```

```
PG13ZIt4a11}}

Out[6]= {9, {PA3ZIt3a11 → 1, PA3ZIz7a11 → 1, PA4ZIt4a11 → 1, PA5ZIt5a11 → 1,
PA5ZIz7a11 → 1, PA5ZIz8a11 → 1, PC13ZIt5a11 → 0, PC13ZIz7a11 → 0,
PC13ZIz8a11 → 0, PD13ZIt3a11 → 0, PD13ZIz7a11 → 0, PG13ZIt4a11 → 0}}
```

Wyniki przedstawiono na rysunku 6.6. Zakolorowane komórki na zielono są elementami wyznaczonymi przez program, wiersze z nazwą przebiegu zakolorowane na niebiesko (A3, A4, A5) są to przebiegi realizujące wyznaczone algorytmy – zadania sprawdzające, koszt 9. Ponadto trzeba pamiętać o zadaniach niezbędnych wcześniej wyznaczonych – A11, A2, 21, B1, B11, B21, E i F (koszt 114).

Sumaryczny koszt 123, efektywność 0,48.



Rys. 6.6 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli algorytmów odcinków torowych i zwrotnicowych

Podsumowując, otrzymane wyniki pokrywają wszystkie badane algorytmy sterowania i kontroli co jest w pełni zgodne z założeniem, że każda funkcja musi być sprawdzona co najmniej jeden raz. Nie wszystkie zadania są wykorzystywane co również jest zgodne z założeniami autorskiej metody. Otrzymany zbiór sprawdzeń jest suboptymalny. Funkcją celu jest koszt realizacji zbioru zadań oraz ilość badanych funkcji jednym zadaniem. Jak można zauważyć celem sprawdzenia funkcji realizowanych przez system nie ma potrzeby wykorzystywać wszystkich dostępnych przebiegów.

7 Podsumowanie i osiągnięcia

Rozprawa doktorska dotyczy metody generowania testów służących do badania stanu funkcjonalnego urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Stosowane urządzenia w kolejnictwie są wykonane w różnych technologiach przez co posiadają bardzo zróżnicowaną strukturę techniczną i funkcjonalną. Przyjętym zamierzeniem rozprawy było opracowanie metody wyznaczania zbiorów testów funkcjonalnych służących do kontroli stanu urządzeń sterowania ruchem kolejowym niezależnie od ich technologii wykonania. Na wstępie sformułowano problematykę badania urządzeń i cel stosowania testów. Rozeznanie w publikacjach potwierdziło zainteresowanie tematyką zastosowania narzędzi w procesach diagnostyki i monitorowaniu stanu czy weryfikacji i walidacji urządzeń. Tendencje zwykle skupiają się wyłącznie na poszczególnych elementach jak zwrotnica, sygnalizator lub na poziomie urządzeń kierowania ruchem. Instrukcje zarządcy infrastruktury nie wskazują na stosowanie jakichkolwiek metod i narzędzi wspomagania w procesach diagnozowania urządzeń, tworzenia planów przeglądów i realizacji badań. Wszelkie działania utrzymaniowe realizowane są w ramach planowanych działań lub na bieżąco po występujących usterkach. Niezależnie od celu testów, wpływają one na dostępność urządzeń do prowadzenia ruchu, ponadto testy mogą być niekompletne, nie uwzględniające wszystkich badanych elementów. Proponowana metoda może pełnić więc rolę narzędzia wspomagającego procesy utrzymaniowe czy certyfikacyjne i temu poświęcona jest rozprawa. W rozdziale 1 przedstawiono cel, tezę i zakres pracy. Wskazano na znaczenie poznawcze pracy oraz jej znaczenie utylitarne.

Aby zrealizować cel pracy w rozdziale 2 opisano urządzenia sterowania ruchem kolejowym. Przedstawiono istotę stosowania urządzeń ich rodzaje i podział. Wyróżniono istotne wymagania stawiane urządzeniom srk jak niezawodność a szczególną uwagę poświęcono dostępności urządzeń oraz jakie parametry wpływają na wskaźnik dostępności. Następnie w rozdziale 3 dokonano identyfikacji własności funkcjonalno – diagnostycznych urządzeń srk. Zidentyfikowano metody jakie są stosowane w diagnostyce obiektów technicznych i zwrócono uwagę na przydatność tych metod w badaniu urządzeń sterowania ruchem. Następnie skoncentrowano się na metodyce badań funkcjonalnych urządzeń srk, przeprowadzanych na różnych etapach w cyklu życia urządzeń. Na etapie wdrażania urządzeń są realizowane testy certyfikacyjne i odbiorcze, następnie podczas eksploatacji są to badania

okresowe, ponaprawcze i powypadkowe, niekiedy odbiorcze urządzeń zmodyfikowanych lub czasowo wyłączonych z eksploatacji. Dla każdego przypadku opisano cel i formę kontroli. Jednym z elementów kontroli jest ich monitorowanie podczas normalnej eksploatacji. Dyżurny ruchu podczas wprowadzania poleceń jest w stanie określić stan funkcjonalny urządzeń. Obserwując monitory ze zobrazowaniem urządzeń może zaobserwować reakcje na wprowadzane polecenia i określić stan funkcjonalny systemu. Taka kontrola będąca monitorowaniem, stanowiąca istotny element eksploatacji urządzeń również została szczegółowo opisana oraz zamodelowana.

Opracowany w rozdziale 4 model stacyjnych urządzeń sterowania ruchem kolejowym uwzględnia struktury funkcjonalne oraz stany i statusy w jakich mogą znajdować się elementy konfiguracji wynikające z realizacji zadań. Urządzenia stacyjne są najbardziej rozbudowane pod kątem realizowanych funkcji ze wszystkich występujących, zawierają najwięcej możliwych elementów oraz ich stanów. To jest powodem, że zostały wybrane celowo do opracowania metody. Pośrednim zamierzeniem pracy było opracowanie metody na tyle uniwersalnej, żeby mogła być stosowana do kontroli innych klas urządzeń aniżeli opracowanej w niniejszej rozprawie. Przedstawiony model oraz metoda są na tyle uniwersalne, że mogą zostać zastosowane do urządzeń liniowych, systemów sygnalizacji przejazdowej czy nawet systemów powiązanych oraz dowolnej wielkości stacji.

Wyznaczając suboptymalny zbiór testów można dokonać redukcji zbioru sprawdzeń dostępnych do zbioru wystarczającego do określenia stanu badanych urządzeń. Znając cel sprawdzeń można określić algorytmy do zbadania. Tylko określonymi sprawdzeniami można zbadać te algorytmy więc pozostałe sprawdzenia nie będą brane pod uwagę. W rezultacie otrzymujemy zbiór sprawdzeń celowych, z którego wyznaczamy sprawdzenia niezbędne. Jeżeli otrzymany zbiór już jest wystarczający do określenia stanu funkcjonalnego, można przystąpić do realizacji testów. W innym przypadku zbiór sprawdzeń należy, uzupełnić o sprawdzenia dodatkowe. Ich wybór jest uzależniony od kosztu ich realizacji. Koszt sprawdzenia uwzględnia jego pracochłonność wynikającą z zaangażowania personelu do doprowadzenia urządzeń do określonego statusu. Jest tym większy im więcej urządzeń trzeba wysterować. Opracowana metoda została przedstawiona w rozdziale 5 rozprawy.

Rozdział 6 zawiera weryfikację metody na przykładzie zawierającym większą pulę badanych elementów. Wyznaczone są zbiory sprawdzeń dla całej aplikacji jak i grup

semaforów, zwrotnic czy odcinków torowych. Dla każdego z przypadków przedstawiono wydruki programów.

Opracowana metoda pozwala na kontrolę stanu funkcjonalnego zarówno całej struktury urządzeń jak również wybranych elementów ich konfiguracji. Należy zwrócić uwagę że im większa stacja tym efekty z zastosowania metody są większe. Metoda dedykowana jest głównie dla komputerowych urządzeń stacyjnych ale może być również stosowana do urządzeń starszych generacji. Wynika to z założeń i opisu modelu, który w łatwy sposób można rozbudować o dowolne elementy. Istotną cechą zaproponowanej metody kontroli stanu jest możliwość stosowania bez jakiejkolwiek ingerencji w strukturę badanego systemu, bez stosowania dodatkowej specjalistycznej aparatury pomiarowej. Nie potrzeba wiec budowy skomplikowanych interfejsów nie wpływających na działanie urządzeń. Wykorzystywane są naturalne sygnały i polecenia używane w użytkowaniu systemów. Proces kontroli odbywa się z wykorzystaniem typowych elementów do wprowadzania poleceń nastawczych – pulpitów nastawczych, przez co może być stosowana przez mniej doświadczone zespoły. Metoda bazuje na badaniu zdolności urządzeń srk do realizacji określonych funkcji przez co wpisuje się w istniejące aktualnie formy badania diagnostycznego urządzeń, po konserwacji czy naprawie jak również prób funkcjonalnych realizowanych w celach weryfikacji i certyfikacji urządzeń na zgodność z wymaganiami. Może z powodzeniem zostać zastosowana w wymienionych obszarach badawczych.

Reasumując dokonania pracy i biorąc pod uwagę jej rezultaty autor wyraża opinię, że teza pracy mówiąca o tym, że metoda wyznaczania testów funkcjonalnych generuje zbiór testów, wystarczający do określenia stanu urządzeń sterowania ruchem kolejowym - została udowodniona, co można potwierdzić tym, że:

- wykazano, że przedmiot rozprawy związany z badaniem stanu funkcjonalnego urządzeń w trakcie ich projektowania, certyfikacji czy eksploatacji, wpisuje się w zagadnienia w aspektach ekonomicznych, technicznych i organizacyjnych,
- sformułowano sposoby kontroli stanu urządzeń,
- przedstawiono algorytm metody wyznaczania zbioru testów,
- przedstawiono w sposób sformalizowany metodę wyznaczania zbioru testów,

- zaimplementowano rozwiązanie w środowisku obliczeniowym wspomagającym proces wyznaczania zbioru,
- zweryfikowano metodę na przykładzie urządzeń stacyjnych jako najbardziej rozbudowanych funkcjonalnie.

Kierunki dalszych badań w obszarze badawczym związanym z tematyką rozprawy autor określił by następująco:

- W nowoczesnym podejściu do projektowania urządzeń wykorzystuje się np. technologie wielowymiarowego modelowania informacji o obiekcie BIM (ang. Building Information Modeling), dedykowane oprogramowanie CAD (SEE Electrical, PC Schematic) czy oprogramowanie autorskie biur projektowych. Opracowanie narzędzia generującego dane wykorzystywane w metodzie z wymienionych narzędzi znacznie przyspieszyłoby i ujednoliciło proces tworzenia testów.
- Określone zbiory sprawdzeń do badań utrzymaniowych, okresowej diagnostyki urządzeń czy poszczególnych elementów można zacząć generować na etapie projektowana urządzeń. Byłby to element dokumentacji eksploatacyjnej urządzeń dla użytkownika.
- Implementacja automatycznych przypomnień w systemach sterowania ruchem kolejowym o konieczności przetestowania określonych funkcji, szczególnie tych które nie są często używane podczas prowadzenia ruchu. Takie okresowe monitorowanie jest istotne z punktu widzenia dostępności urządzeń, pozwoli na wcześniejsze pojęcie działań naprawczych. Podobne rozwiązania są stosowane np. w systemach zobrazowania, które wymusza sprawdzenie poprawności wyświetlania barw i symboli przez monitory zobrazowania.

8 Bibliografia

[1] Armstrong K., Williams T.: EMC Testing Part 1 – 6, EMC + Compliance Journal, February 2001.

[2] Bertieri D., Ceccarelli A., Zoppi T., Mungiello I., Barbareschi M., Bondavalli A.: Development and validation of a safe communication protocol compliant to railway standards. Journal of the Brazilian Computer Society 27(5), 2021. DOI 10.1186/s13173-021-00106-w.

[3] Będkowski L., Dąbrowski T.: Podstawy eksploatacji, Podstawy diagnostyki technicznej. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2000.

[4] Cheng Y., Zhao H.: Fault detection and diagnosis for railway switching points using fuzzy neural network. 10 IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications 2015, Auckland, New Zealand, pp. 876-881, 2015.

[5] Dąbrowa-Bajon M. Karbowiak H. Grochowski K.: Zasady projektowania systemów i urządzeń sterowania ruchem kolejowym. WKiŁ, Warszawa 1981.

[6] Dąbrowa-Bajon M.: Podstawy sterowania ruchem kolejowym. Funkcje, wymagania, zarys techniki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.

[7] Drózd P., Konopiński L. Badania systemów sterowania ruchem kolejowym w procesie ich certyfikacji. Problemy kolejnictwa, z. 152, Instytut Kolejnictwa 2011.

[8] Drózd P.: Badania funkcjonalne w procesach certyfikacji i eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Logistyka, nr 4, 2015, s. 176-182.

[9] Drózd P.: Integracja funkcjonalna urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, nr 95, 2013, s. 93-104.

[10] Drózd P.: Analiza właściwości funkcjonalno - diagnostycznych urządzeń srk. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, nr 113, 2016, s. 121-130.

[11] Drózd P., Rosiński A, Konopiński L.: Badania funkcjonalne urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Problemy Kolejnictwa, z. 186, 2020, s.23-28.

[12] Drózd, P., Rosiński, A.: Problematyka dostępności urządzeń srk w procesie eksploatacji. Siergiejczyk Mirosław (red.):Materiały XLVIII zimowej szkoły niezawodności. Niezawodność systemów technicznych, Szczyrk 2020.

[13] Drózd P., Rosiński A.: Badania funkcjonalne systemu ETCS i sterowania ruchem kolejowym, WUT Journal of Transportation Engineering, vol. 133, 2021, pp. 15-25, DOI: 10.5604/01.3001.0015.6497.

[14] Durmus M., Takai S., Soylemez, M.: Fault Diagnosis in Fixed-Block Railway Signaling Systems: A Discrete Event Systems Approach. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 9, 2014, pp. 523–531.

[15] Durmus M.S., Ustoglu I., Tsarev R. Z., Schwarz M.: Modular Fault Diagnosis in Fixed-Block Railway Signaling Systems. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 9(5), 2014.

[16] Feng J., Zhang J., Cai B.: Fault Diagnosis Method of the On-board Equipment of Train Control Systems Based on Rough Set Theory. IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017.

[17] Fidali M., Wojciechowski P., Pełka A.: Fault Detection of Railway Point Machine Using Diagnostic Models. Springer International Publishing AG 2018, Timofiejczuk A. et al. (eds.), Advances in Technical Diagnostics, Applied Condition Monitoring 10, DOI 10.1007/978-3-319-62042-8_25.

[18] Feng G., Wei X.: Research on Function Test Method of Intelligent High-speed Railway Centralized Traffic Control System. 36th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), IEEE Xplore, 2021 DOI 10.1109/YAC53711.2021.9486513.

[19] Gutenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów. Omnitech Press, Warszawa 1992.

[20] He Y., Zhao H., Tian J., Zhang M.: Railway Turnout Fault Diagnosis Based on Support Vector Machine. International Conference on Mechatronics Engineering and Computing Technology (ICMECT), Applied Mechanics and Materials, vol. 556-562, pp. 2663-2667, 2014.

[21] Kawalec P., Firląg K.: Weryfikacja i testowanie urządzeń sterowania ruchem drogowym realizowanych w układach FPGA. Logistyka, nr 6, 2009.

[22] Kawalec P., Firląg K.: Testowanie układów sterowania ruchem drogowym w strukturach FPGA. Politechnika Radomska, Prace Naukowe – Elektryka, nr 1 (9), 2005, ss. 89–94.

[23] Koliński D.: Metoda specyfikacji i weryfikacji funkcji zależnościowych w systemach sterowania ruchem kolejowym. Rozprawa doktorska, Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.

[24] Kuzniecow P.I, Pczelincew L.A, Gajdienko W.S.: Optymalizacja diagnostyki systemów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1972.

[25] Lv J., Wang H., Liu H., Zhang L.: A Model-based Test Case Generation Method for Function Testing of Train Control Systems. IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2016, pp. 334-346, DOI 10.1109/ICIRT.2016.7588752.

[26] Liu B., Ghazel M., Toguyeni A.: Model-Based Diagnosis of Multi-Track Level Crossing Plants. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 17, issue 2, pp. 546-556, 2016.

[27] Liu M., Yan X., Sun X., Dong W., Ji Y.: Fault Diagnosis method for Railway Tumout Control Circuit based on Information Fusion. IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Proceedings, pp. 315-320, 2016.

[28] Marąuez F. P. G., Pedregal D. J., Roberts C.: New methods for the condition monitoring of level crossings. International Joumal of Systems Science, vol. 46, issue 5, pp. 878-884, 2015.

[29] Program badań terenowych i eksploatacyjnych systemów ESTW L90 5, Coammand 900 Politechnika Warszawska Wydział Transportu Zakład Sterowania Ruchem Kolejowym, Warszawa, listopad 2005.

[30] Raport z testów terenowych i badań eksploatacyjnych systemów ESTW L90 5 i Command 900 Politechnika Warszawska Wydział Transportu PWWT-6/2008, Warszawa, wrzesień 2008 z załącznikami:

Załącznik 1:Wyniki testów terenowych systemów ESTW L90 5 i Command 900 LCS Poznań.

Załącznik 2: Wyniki badań eksploatacyjnych systemów ESTW L90 5 i Command 900 LCS Poznań.

[31] Opinia o systemie ESTW L90 5 po testach terenowych i badaniach eksploatacyjnych Politechnika Warszawska Wydział Transportu PWWT-7/2008, Warszawa, wrzesień 2008.

[32] Opinia o systemie ESTW L90 5 po testach terenowych i badaniach eksploatacyjnych, Politechnika Warszawska Wydział Transportu PWWT-7/2008Wrzesień 2008.

[33] Program badań uzupełniających systemu Command 900 Politechnika Warszawska Wydział Transportu Opracowanie nr PWWT – 1/2009 Warszawa, styczeń 2009.

[34] Raport z badań uzupełniających systemu Coammand 900 Politechnika Warszawska Wydział Transportu Opracowanie nr PWWT – 2/2009 Warszawa, styczeń 2009.

[35] Opinia o systemie Command 900 po testach i badaniach eksploatacyjnych Politechnika Warszawska Wydział Transportu Opracowanie nr PWWT – 3/2009 Warszawa, styczeń 2009.

[36] Program badań. System samoczynnej sygnalizacji przejazdowej typu RBÜT-PL. Laboratorium badawcze urządzeń i systemów sterowania transportu szynowego Movares Polska sp z o. o. grudzień 2010.

[37] Raport z testów laboratoryjnych układu powiązania Wes napędu zwrotnicowego L826H z kontrolerem Zprk. Politechnika Warszawska Wydział Transportu, Opracowanie nr PWWT – 7/2012 Warszawa, kwiecień 2009.

[38] Opinia techniczna po testach eksploatacyjnych samoczynnej sygnalizacji przejazdowej RBÜT-PL. Politechnika Warszawska Wydział Transportu WTBD/5/N-498/12, Opracowanie PWWT-20/2012, Warszawa listopad 2012.

[39] Opinia techniczna po próbach eksploatacyjnych układów powiązania systemu ESTW L90 5 z ssp RASP-4Ft i SPA-5 oraz sbl SHL-12. Politechnika Warszawska Wydział Transportu WTBD/5/N-497/12, Opracowanie PWWT-21/2012, Warszawa listopad 2012.

[40] Raport z testów i badań eksploatacyjnych urządzenia zerowania liczników osi UZO. Politechnika Warszawska Wydział Transportu, Opracowanie nr PWWT – 2/2013 Warszawa, marzec 2013.

[41] Raport z testów terenowych i badań eksploatacyjnych systemu samoczynnej sygnalizacji przejazdowej RBÜT-PL. Politechnika Warszawska Wydział Transportu WTBD/5/N-203/13, Opracowanie nr PWWT-8/2013, Warszawa, maj 2103.

[42] Spunei E., Piroi I., Chioncel C., Piroi F.: Computerized Diagnostic of the Red and White Entry Lighting Signal Indications International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) 2016.

[43] Opinia o systemie samoczynnej sygnalizacji przejazdowej RBÜT-PL po testach terenowych i badaniach eksploatacyjnych. Politechnika Warszawska Wydział Transportu WTBD/5/N-204/13, Opracowanie nr PWWT-9/2013, Warszawa, maj 2013.

[44] Opinia techniczna o samoczynnej sygnalizacji przejazdowej RBUT-PL po dodatkowych badaniach eksploatacyjnych. Politechnika Warszawska Wydział Transportu WTBD/5/N-377/13, Opracowanie nr PWWT-20/2013, Warszawa, październik 2013.

[45] Rozwadowski T.: Diagnostyka techniczna obiektów złożonych. WAT Warszawa 1983.

[46] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.

[47] Mickiewicz T., Mikulski A.: Elektryczne urządzenia zabezpieczenia ruchu kolejowego: urządzenia stacyjne. WKiŁ, 1968.

[48] Wawrzyński W.: Bezpieczeństwo systemów sterowania w transporcie. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Warszawa-Radom 2004.

[49] Ważyński T., Karaś S.: Urządzenia zabezpieczenia ruchu kolejowego. WKiŁ, 1965.

[50] Wróbel Z.: The Electromagnetic Compatibility in Researches of Railway Traffic Control Devices. In: Mazur D., Gołębiowski M., Korkosz M. (eds) Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 452. Springer, Cham 2018.

[51] Theeg G., Vlasenko S.: Railway Signaling & Interlocking. International Compendium. Eurailpress, Hamburg 2009.

[52] Stanley P.: ETCS for engineers, IRSE 2011.

[53] Sztarski M.: Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektronicznych. Wydawnictwo komunikacji i łączności, Warszawa 1972.

[54] Magott J., Lewiński A., Perzyński, T.: Semi-formal methods in safety railway control systems validation. Archives of Transport System Telematics, vol. 6, issue 1, pp. 32-36, 2013.

[55] Mellado J., Dueñas J. C.: Automated Validation Environment for a Product Line of Railway Traffic Control Systems. Software Product-Family Engineering: 4th

International Workshop, PFE 2001, F. van der Linden (Ed.): PFE-4 2001, LNCS 2290, pp. 401–408, 2002. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2002.

[56] Nicola G., Tommaso P., Esposito R., Flammini F., Orazzo A.: A Hybrid Testing Methodology for Railway Control Systems. SAFECOMP 2004: Computer Safety, Reliability, and Security, pp 116-129.

[57] PN-EN 50126-1:2018-02: Zastosowania kolejowe - Specyfikowanie i wykazywanie niezawodności, dostępności, podatności utrzymaniowej i bezpieczeństwa (RAMS) - Część 1: Proces ogólny RAMS.

[58] PN-EN 50128:2011/A1:2020-07: Zastosowania kolejowe - Systemy łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem - Oprogramowanie kolejowych systemów sterowania i zabezpieczenia.

[59] PN-EN 50129:2019-01: Zastosowania kolejowe - Systemy łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem - Elektroniczne systemy sterowania ruchem związane z bezpieczeństwem.

[60] Nowakowski W.: Diagnostyka systemów automatyki kolejowej jako metoda poprawy bezpieczeństwa. Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu 2018.

[61] Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 23 stycznia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji. Dz.U. 2015 poz. 360.

[62] Instrukcja o zasadach eksploatacji i prowadzenia robót w urządzeniach sterowania ruchem kolejowym Ie-5, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A Warszawa 2005.

[63] Wytyczne odbioru technicznego oraz przekazywania do eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym Ie-6, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A Warszawa 2005.

[64] Instrukcja diagnostyki technicznej i kontroli okresowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym Ie-7, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A Warszawa 2005.

[65] Instrukcja konserwacji, przeglądów oraz napraw bieżących urządzeń sterowania ruchem kolejowym Ie-12, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A Warszawa 2017.

[66] Sandidzadeh M. A., Dehghani M.: Intelligent condition monitoring of railway signaling in train detection subsystems. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol. 24, issue 4, pp. 859-869, 2013.

[67] Surma S., Gołębiewski M.: Testing Station-Related Railway Control Systems—Functional and Failure-Response Tests. 13th Scientific and Technical Conference "Transport Systems. Theory and Practice 2016" Katowice, Poland, September 19–21 2016, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 505, 2017, pp. 195-204.

[68] System Requirements Specification Chapter 7 ERTMS/ETCS language ERA UNISIG EEIG ERTMS USERS GROUP 07/03/2012.

[69] Wytyczne badania urządzeń sterowania ruchem po wypadku kolejowym Ie-15. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A, Warszawa 2005.

[70] Warunki bezpiecznej instalacji i eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Ie-100a PKP Polskie Linie Kolejowe, Warszawa 2015.

[71] Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej. Zakład sterowania ruchem kolejowym. Słownik poleceń i skrótów.

[72] Wymagania bezpieczeństwa dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym – DG PKP KA nr KA2b-5400-01/98 z dnia 06.02.1998.

[73] Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym Ie-4 (WTB-E10), PKP PLK, Warszawa 2014.

[74] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych Dz.U. z dnia 30 maja 2014, poz. 720.

[75] Song Pengfei, Zhao Hongtao, Wang Tao: Study on Intelligent Centralized Traffic Control System of Multi-system Data Fusion. Railway Standard Design, vol. 65, p 168-172, 2021.

[76] Tatale S., Chandra Prakash V.: Combinatorial test case generation from sequence diagram using optimization algorithms. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 2022. DOI: 10.1007/s13198-021-01579-w.

[77] Zhao J., Zheng W.: Study of fault diagnosis method based on fuzzy Bayesian network and application in CTCS-3 train control system. IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings, 2013.

[78] Dokumentacja Techniczno Ruchowa System ESTW L90 5. Thales Polska 2015.

[79] www.mathematica.pl (data dostępu: lata 2019-2022).

Spis rysunków

Rys. 1.1 Model systemu komputerowego sterowania ruchem kolejowym 12
Rys. 2.1 Graficzne zobrazowanie dostępności urządzeń z opisem stanów [źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN 50126] 29
Rys. 2.2 System srk i jego otoczenie 32
Rys. 2.3 Podział stacyjnego systemu srk na warstwy na przykładzie systemu w technologii komputerowej 35
Rys. 3.1 Model testowania systemów srk metodą czarnej skrzynki 55
Rys. 3.2 Model realizacji funkcji przez system srk 64
Rys. 3.3 Kontrola funkcjonowania systemu srk 65
Rys. 3.4 Monitorowanie systemu podczas realizacji zadania przez urządzenia stacyjne 67
Rys. 3.5 Kontrola funkcjonowania podczas badania urządzenia po naprawie 69
Rys. 3.6 Kontrola funkcjonowania podczas badań certyfikacyjnych 70
Rys. 4.1 Fragment tablicy zależności 78
Rys. 5.1 Ogólny algorytm postępowania wyznaczania suboptymalnego zbioru sprawdzeń ... 85
Rys. 5.2 Układ torowy przykładowej aplikacji wraz z istotnymi elementami (fragment) 86
Rys. 5.3 Tablica zależności dla stacji przykładowej aplikacji 88
Rys. 5.4 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli 92
Rys. 6.1 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi sprawdzeniami niezbędnymi 104
Rys. 6.2 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z usuniętymi sprawdzeniami niezbędnymi w wierszach i kolumnach 105
Rys. 6.3 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli całej aplikacji 110
Rys. 6.4 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli algorytmów zwrotnicowych. 113
Rys. 6.5 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli algorytmów semaforów 116
Rys. 6.6 Tablica zależności w zapisie algorytmów sterowana i kontroli z zaznaczonymi zadaniami wyznaczonymi programem do kontroli algorytmów odcinków torowych i zwrotnicowych 119

Spis tabel

Tabela 1. Zależność pomiędzy SIL a TFFR 29
Tabela 2. Zbiór zadań zawierający konfiguracje funkcjonalne 79