

Paweł DRÓZD, Adam ROSIŃSKI  
Warsaw University of Technology (Politechnika Warszawska)

## ISSUES OF RAILWAY TRAFFIC CONTROL DEVICES AVAILABILITY IN THE EXPLOITATION PROCESS

### Problematyka dostępności urządzeń sterowania ruchem kolejowym w procesie eksploatacji

**Abstract:** *This article focuses exclusively on the issues of railway traffic control devices availability in traffic management. One of the factors affecting this availability are tests conducted during maintenance or repair works. A review of the literature in the field of test determination methods was conducted. Next, the railway traffic control system was described and the elements influencing availability were defined. Assumptions and an algorithm of the procedure were presented and the method of determining the tests was proposed.*

**Keywords:** tests, railway, control, methodology

**Streszczenie:** *Artykuł skupia się wyłącznie na problematyce dostępności urządzeń sterowania ruchem kolejowym do prowadzenia ruchu. Jednym z czynników mającym wpływ na dostępność są testy realizowane w trakcie prac utrzymaniowych czy naprawach. Dokonano przeglądu literatury w zakresie istnienia metod wyznaczania testów. Następnie przedstawiono system sterowania ruchem kolejowym i zdefiniowano elementy wpływające na dostępność. Przedstawiono założenia i algorytm postępowania oraz zaproponowano metodę wyznaczania testów.*

**Słowa kluczowe:** testy, kolej, kontrola, metodologia

## **1. Introduction**

Functional tests are an essential element in the maintenance and diagnosis of railway traffic control (rtc) devices. The aim of tests is to check the functionality of the system in terms of compliance with the traffic and signalling rules. They serve to identify the functionality state of the device, whether the system is functional or not (whether the functions – tasks are performed correctly) during the diagnosing process, after the corrective, repair or the maintenance processes. They are helpful in controlling the correctness of the repair work and determining the location of the fault [1, 2]. The diagnosis issue is tackled in the following publications [4÷6, 11], which focus on controlling the state in order to improve reliability, traffic safety and availability of railway traffic control systems. Publication [11] describes the application of fuzzy neural networks in a typical track circuit as a way to detect fault and diagnose failure. Articles [4, 5] present fault diagnosis with the employment of Petri net in railway signalling systems within a fixed block. [6] includes a diagnostic method of failures of train control onboard devices with the application of rough set.

One of the elements of the system life cycle is its validation. The validation stage stands for complex inspection of the system and is crucial to check the requirements and assumptions of the system and to confirm its safety. Literature references [7÷10] directly address the system validation. They describe the meaningfulness of testing during the development stage employing a variety of methods recommended in the normative documentation, but also include suggestions how to extend and modify these recommended methods. Publication [8] describes a method of extending method FTA (Fault Tree Analysis) into FTTD (Fault Tree with Time Dependencies) and the application of THR (Tolerable Hazard Rate) method analysis to analyse the probability of catastrophic failure occurrence on the basis of stationary Markov process. Publication [7, 10] suggest an ASF hybrid testing methodology combining black-box and white-box techniques and the method of generating a test case based on two main formal languages (HCSP and Timed Automaton) and two popular tools (UPPAAL anCoVer). In study [9] the validation issues of independent module IM software and FEC external module devices are presented. The suggested environment complements the traditional manual black-box tests and efficiency tests in the software development process. Automatic validation is supported by producer's scripts, which generate software testing samples, whereas the testers decide which samples are to be executed.

The presented methodologies and tools focus on the running of internal tests, on monitoring the state of tools and diagnosing with the use of models describing systems utilising diverse tools and methods. The adopted in the article attitude is different, because the employed method involves study of a real system in conditions of its use as a whole and applying real forcing signals and real reactions of devices.

Inability to perform tasks by the system of railway traffic control devices deteriorates the flow of traffic and sometimes its safety, moreover, it generates costs and engages staff in additional tasks and procedures. Factors limiting the availability of traffic management devices have been observed among which are functionality tests conducted during repair and maintenance works. In order to minimise the influence of the exploitation process, specifically the influence of conducting tests on the devices availability the authors have devised a universal methodology of determining such tests. The production technology does not limit the application of the method. The same functions are available (safe execution of commands). The only difference is their implementation (in relay or microprocessor logic), yet it does not affect the application of the methodology and the purpose of the devices, whether they are station or line devices.

## **2. Railway traffic control devices and exploitation process**

The basic function of the railway traffic control system is safe train traffic management by excluding the risk of vehicle collisions. RTC devices in terms of their functions can be divided into:

- station devices (including marshalling yard devices),
- line devices,
- traffic security at railway crossings,
- remote control and dispatch control devices,
- transmission of track-to-vehicle information (cabin signaling and ETCS).

Execution with the use of various technologies, ranging from mechanical, through electromechanical, relay, electronic and computer (along with hybrid solutions), depends on the technological progress. Control is carried out using various types of external and internal devices, while meeting the conditions for safe driving. The external devices include signaling devices, switches / derailments, track vacancy control systems and turnouts, located in appropriate places of the track system. The internal devices, which are a dependent layer, implement and control the correctness of conditions for safe driving by bringing the switches to the required position, checking the vacancy of track sections and switch points and excluding simultaneous implementation of contradictory runs. Polish railways are equipped with all solutions, which technical devices provide, like in developed countries. The basic functions of traffic control systems used in the world are the same despite the differences in the rules of signaling.

Devices were introduced because of the repeatability and reliability of operation in comparison to humans. To ensure a high level of safety, appropriate design and structure of devices demanded. In accordance with the normative recommendations, we distinguish four levels of security, depending on the purpose of the devices. Level 1 refers to devices not

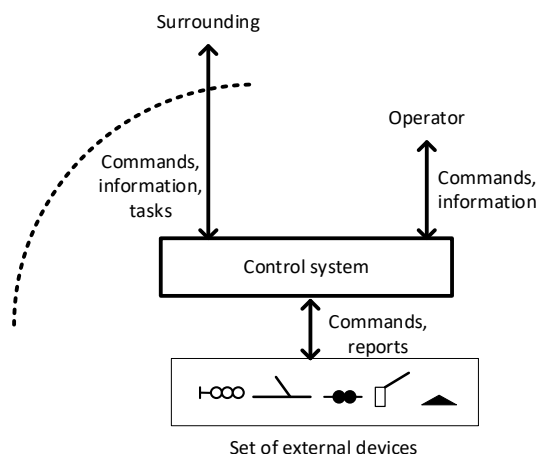
related to traffic safety (e.g. information for travelers). Their damage will not cause any hazard, while level 4 is the highest level and a potential fault results in the loss of human health and life. In most cases, level 4 is required for RTC devices of the dependency and execution layer. Level 3 in such cases is hardly ever recommended. Currently, according to the standard PN-EN 50129, the SIL level is determined by TFFT (tolerable functional failure rate) - the permissible functional failure rate, as presented in table 1.

**Table 1**

**SIL and TFFT dependency**

SIL level	TFFT value (per h, function)
4	$10^{-9} \leq \text{TFFT} < 10^{-8}$
3	$10^{-8} \leq \text{TFFT} < 10^{-7}$
2	$10^{-7} \leq \text{TFFT} < 10^{-6}$
1	$10^{-6} \leq \text{TFFT} < 10^{-5}$

The system of railway traffic control is a set of control and controlled devices (elements) and covers a specific area of control. These devices compose the technical structure of the control system and their connections constitute the functional structure of the rail traffic control system. The structure of the system is unique for each individual control area. The elements are controlled with the use of strictly defined control algorithms. The general structure of the rail traffic control system is shown in fig. 1.



**Fig. 1.** Structure of rail traffic control system

Railway traffic control system is a system with a dispersed technical structure, executing many strictly defined tasks – routes. Each task is executed under strictly defined functional configuration of the system elements – points, signalling devices, availability control system. An element should be understood as a set of devices and connections e.g. signalling device consists of a physical signal, light bulbs, transformers, power supply cable network, dependency device executive controller card. Functional configuration is a serial structure. During specific route execution elements must be available (functional and unsupported) and cannot be engaged in other tasks. Unavailability of one of the elements of the configuration leads to only partially limited execution of the tasks by the system. Tasks, which functional configurations do not comprise the unavailable element, can be executed freely. Failure of a single element does not completely limit railway traffic control system availability. The system is a multitask system possessing functional redundancy. This does not mean that we will perform exactly the same task e.g. accepting a train on a specific track. Failure of a component, which takes part in the task renders the performance of the task impossible, but due to the multitasking of railway traffic control system a different task will be performed in a different configuration - accepting a train on a different track.

Intuitive formulation of a test plan as well as testing devices during maintenance and repair works prolongs these procedures, which negatively affects the availability rate. There is a lack of detailed methods for determining tests even though instructions from infrastructure manager (Ie-7, Ie-12) recommend that the tests be performed. During the performance of tasks at the traffic station, some functions are not used at all or very rarely and may not be included in the diagnostic program for the station. Repair and testing takes place after a failure to perform an action is noted by the operator – signaller - or information about the failure is reported by internal diagnostic system. By starting the repair it is essential to determine the failure location. The damaged components are at times located immediately, yet in case of some it is necessary to conduct tests narrowing the set of possible damaged elements. Having determined the damaged element the proper repair takes place, which when completed is followed by checking. Post-repair tests or the ones resulting from planned or periodical diagnosis involve checking the function performance correctness, in which the repaired component is the task configuration element. The simplest way to restrict the influence of testing on availability is to conduct tests during periods of little train traffic, yet faults happen suddenly and randomly.

All railway traffic control devices undergo diagnostic and control tests regardless of their function (station, line, level crossing signalling, ETCS, etc.), production technique (mechanical, relay, computer) and technical condition. It is obvious that the older and the more exploited the device is the more often it requires maintenance measures executed beside the established strategy. Part of the devices is maintained by the unaided infrastructure manager especially those devices produced in older technologies. Part of the

devices is maintained by the unaided infrastructure manager and this applies mainly to devices made in older technologies, while modern devices are increasingly exclusively operated by the manufacturer's staff. Functional tests of devices are an important and common element of maintenance procedures. All implemented in the devices functions have their system availability verified. This checking is conducted during operating the diagnostic schedule for specific devices [1].

The control tests are conducted on active devices, which are the basis in traffic management, and during the trials track closure is executed disconnecting part of the track layout from traffic. Staff at the post must be involved in operating the devices during testing (route setting, block system direction setting, occupancy simulation etc.). These activities cause limited availability of the devices to manage traffic and affect the traffic situation at the post, which can result in perturbations in rail traffic.

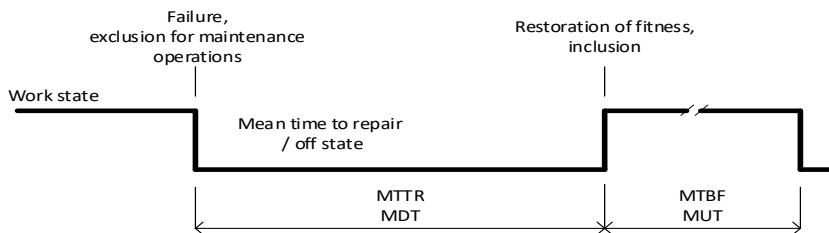
To sum up, carrying out railway traffic control functional tests after component repair or when they are part of maintenance works the following problems occur [1]:

- influence of the testing on the traffic situation on the post or open line,
- railway traffic control system limited availability for traffic management,
- signaller's (and signallers' in nearby posts) involvement to operate devices connected with the testing,
- influence of traffic situation on the testing.

### **3. Railway traffic control devices availability**

Devices availability is the ability to remain in a state allowing proper operation of its functions in defined conditions and time or in a defined time lag while complying with the requirements of the external means [3]. The concept of fitness is used in technical diagnostics. The machine is in a state of fitness when the values of the parameters or state features are within acceptable limits. If the values are exceeded, the machine is in a state of unfitness. The following states can be distinguished:

- functional fitness - meaning the machine's ability to perform a given function in accordance with its intended use,
- performance fitness - meaning the ability of the machine to perform tasks in designated operating conditions under specific activations.



**Fig. 2.** Graphical representation of the availability of devices with status description [source: own elaboration on the basis of PN-EN 50126]

The given diagram (fig. 2) defines the availability of system A as part of the time when the system correctly performs its functions. Assuming that  $MTTR = MDT$  (mean time to repair equals mean down time), the availability can be presented with the following formula:

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT} \leq 1 \quad (1)$$

MDT can be defined as downtime, time when the whole system (in case of dependency unit failure) or its element (point, signal, axle counter section) is non-operational, during which the system (element) is faulty or is undergoing planned service or maintenance. In spite of the causes which led the RTC devices to MDT state, the system as a whole or its part is in a state of complete or partial unavailability and cannot be fully exploited to manage traffic as it has been designed for.

The following time components (MDT) can be distinguished depending on the fault:

- undetected by the service or system operator fault time,
- logistic, administrative and technical delay time,
- repair time,
- testing time after the repair.

The reasons of entering the system into unavailability state do not depend entirely on technical faults of the system. The unavailability also results from maintenance task execution, for the time of which, depending on the scope, the system or its components are excluded from traffic. In addition MDT stands for device maintenance time, which comprises planned diagnosis or device maintenance but also time devoted to testing and inspection and above mentioned repair time.

#### 4. A method of limiting the influence of diagnostic tests on railway traffic control system availability

The fault or control test performance does not influence the unavailability of the whole system control due to the multitasking and functional redundancy. This can be displayed as a quotient of impossible functions to all functions performed by the system. The function in railway traffic control system is the task – route setting or individual instruction. So all these functions comprise all route settings and individual instructions executable on the post. System availability because of its multifunctional property will assume the values in the range  $<0, 1>$  and refers to the given moment of assessment and can be presented with the following formula:

$$A_f = \frac{\sum f_{nd}}{\sum f} \quad (2)$$

where:

$A_f$  – functional availability index,

$f_{nd}$  – functions (tasks) unavailable due to failure / maintenance and the like task configuration element,

$f$  – functions (tasks) performed by railway traffic control system.

Restricting time devoted to testing will have a positive effect on the functional availability of the system. Depending on the station topology damaged or currently being serviced element e.g. the first switch on the station head and home signal, might affect the unavailability of the currently executed tasks on the station. Element unavailability results in impossibility of task performance, in which the device is the element of the task functional configuration. Testing the element used in many tasks causes the biggest system availability loss. This can be displayed with the weighting factor of the system element:

$$W_{ek} = \frac{\sum f_{ek}}{\sum f} \quad (3)$$

where:

$W_{ek}$  – weighting factor and the like unavailable system element,

$f_{ek}$  – functions (tasks), which and the like element is a task configuration element.

A set of tasks together with functional configuration – the fundamental elements for its performance together with the appropriate status of the elements are presented in [1]. Conducting functional tests performed during the repair or service involves setting specific routes and following individual orders. To minimize the testing time and consequently the repair / maintenance time a rational approach to the choice of suboptimal set is crucial. Reducing the time the device configuration is turned off results in increasing the availability



index. This can be achieved by choosing a test set employing issues known from diagnostics and optimisation. The suggested methodology can be extended with elements, which optimize the costs of performing the individual tasks, and test coverage of checked functions.

Optimisation of the functional testing process can be divided into two stages. The first stage involves generating a collection of tests including a collection of tests indispensable to determine the functional fitness of the tested devices. This stage has an underlying assumption that each tested function of the system should be verified at least once. The second stage involves sequencing the previously generated set of tests according to a specific criterion.

Optimal collection of tests is determined for the following assumptions presented on the basis of [1,2]:

1. Control object is the set of all functions performed by railway traffic control. Controlled elements are control algorithms of particular functional configuration devices defined in set  $A_i$ .
2. Available set of tests  $D_d = \{d_j\}$  sufficient for functional state control is available.
3. For each test  $d_j$  a set of elementary algorithms exists. The set of elementary algorithms is the  $d_j$  testing track.
4. The set of costs of testing  $C = \{c_j\}$  is available.
5. A set of tests  $D_{opt}$  which is necessary and sufficient for the purpose of the control of functional state has to be defined. This set is optimal for the particular criterion.

The optimal testing set can be accomplished by determining from the test set available intentional tests  $D_d$ . Intentional test is the test of functions or tests of function set. This limits at the start the number of unnecessary tests. Subsequently necessary testing must be determined and that set must be complemented with additional (redundant) tests and analysed whether the generated test set is sufficient to control functional state of the device and whether all tested functions have corresponding tests. If the set is an insufficient set it has to be completed with additional testing  $D_{nad}$ . The given set is simultaneously optimised in terms of a particular criterion. In accordance with the assumptions this criterion is the generalised cost of individual tests. Optimisation criterion involves choosing the most cost-effective ones yet the chosen test must be sufficient to control the functional state.

Time and additional costs connected with bringing the system and its environment to a state enabling specific testing are divergent and result from technical solutions adopted in the examined system and in the systems functionally connected e.g. type of block, level crossing signalling, types of non-occupancy control systems. Generalising costs is a simplification and yet is sufficient to determine the set because of the difficulties to accurately define the costs of individual tasks. Initially three groups of costs were adopted:

- C0 – testing does not require component (element) state (status) simulation of the examined system and its system environment (and systems functionally connected),
- C1 – testing requires element state (status) simulation of the examined system – e.g. track / point section occupancy simulation, setting the block direction,
- C2 – testing requires change of functionally related systems state (status).

General algorithm scheme of determining optimal testing set is presented in fig. 3.

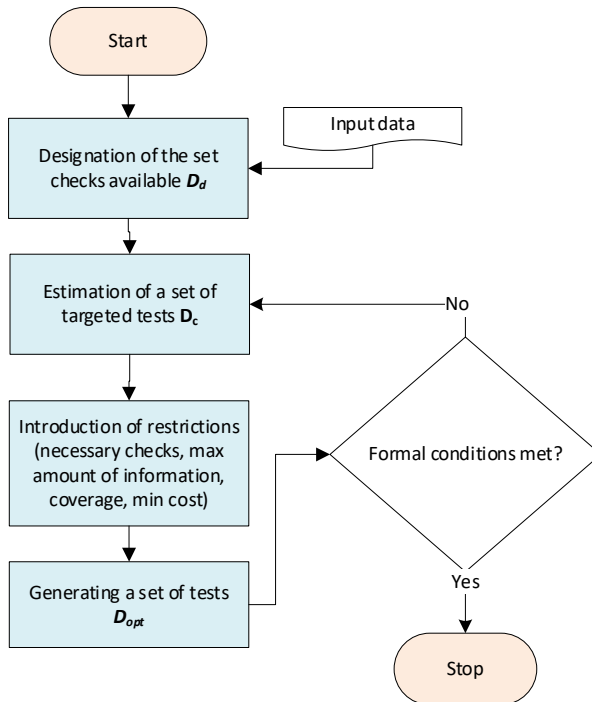


Fig. 3. Algorithm in determining a test set

A test set prepared and determined in such a way will have a positive impact on the values of the functional availability coefficient (3). Fewer functions will be unavailable as a result of the research and thus will increase the value of the Af index. The use of optimisation methods and optimisation of the set, in terms of the adopted defined costs, allows for the determination of a suboptimal set, which will reduce the number of performed tests. The generated set will cover all tested functions with tests.

## 5. Conclusions

The unlimited availability of railway traffic control devices is a prerequisite for safe and smooth train traffic. Maintenance activities, such as repair, maintenance or diagnostics of traffic control devices, are related to carrying out tests. The tests are used to check the correctness of the implemented functions and the location of component damage. Reducing the duration of the maintenance process by reducing the number and duration of tests significantly improves the availability rate of devices. The proposed methodology of determining a test set consists in choosing only necessary tests, which must be conducted and the ones mostly cost-effective. Lack of redundant testing, duplicating information about the functional state of the object and choosing the most cost-effective testing generates a suboptimal test set, which performance has the least impact on the device availability.

## 6. References

1. Drózd P., Rosiński A., Konopiński L.: Badania funkcjonalne urządzeń sterowania ruchem kolejowym. *Problemy Kolejnictwa*, tom 64, zeszyt 186, 2020, DOI: 10.36137/1863P.
2. Drózd P.: Analiza właściwości funkcjonalno-diagnostycznych urządzeń srk. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, nr 113, 2016.
3. Norma PN-EN 50126:2018 Zastosowania kolejowe. Specyfikowanie i wykazywanie Niezawodności, Dostępności i Podatności utrzymaniowej i Bezpieczeństwa (RAMS) (część 1 i 2).
4. Durmus M., Takai S., Soylemez, M.: Fault Diagnosis in Fixed-Block Railway Signaling Systems: A Discrete Event Systems Approach. *Transactions on Electrical and Electronic Engineering IEEEJ Trans*, 9, 2014. DOI: 10.1002/tee.22001
5. Durmus M.S., Ustoglu I., Tsarev R. Z., Schwarz M.: Modular Fault Diagnosis in Fixed-Block Railway Signaling Systems. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, Iss. 3, 2016, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.077.
6. Feng J., Zhang J., Cai B.: Fault Diagnosis Method of the On-board Equipment of Train Control Systems Based on Rough Set Theory. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317955
7. Jidong Lv, Haifeng Wang, Hongjie Liu, Lu Zhang.: A Model-based Test Case Generation Method for Function Testing of Train Control Systems. *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation, ICIRT 2016*. DOI: 10.1109/ICIRT.2016.7588752
8. Magott J., Lewiński A., Perzyński, T.: Semi-formal methods in safety railway control systems validation. *Archives of Transport System Telematics*, Vol. 6, Iss. 1, 2013.

9. 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, 2002. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002. DOI: 10.1007/3-540-47833-7\_37
10. Nicola G., Tommaso P., Esposito R., Flammini F., Orazio A.: A Hybrid Testing Methodology for Railway Control Systems, SAFECOMP 2004: Computer Safety, Reliability, and Security, DOI: 10.1007/978-3-540-30138-7\_11
11. Sandidzadeh M.A., Dehghani M.: Intelligent condition monitoring of railway signaling in train detection subsystems. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Volume 24, Issue 4, 2013. DOI: 10.3233/IFS-2012-0604

# **PROBLEMATYKA DOSTĘPNOŚCI URZĄDZEŃ STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM W PROCESIE EKSPLOATACJI**

## **1. Wprowadzenie**

Testy funkcjonalne są jednym z elementów w utrzymaniu i diagnostyce urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk). Celem testów jest sprawdzenie funkcjonalności systemu pod względem zgodności z zasadami prowadzenia ruchu i sygnalizacji. Służą one do rozpoznania stanu funkcjonalnego urządzeń w procesie diagnozowania, po regulacjach, naprawach, realizacji procesu utrzymania – czy system jest zdalny funkcjonalnie czy nie (czy prawidłowo realizowane są funkcje – zadania). Testy są pomocne w sprawdzeniu poprawności wykonania napraw i lokalizacji usterek [1, 2]. Tematyka diagnostyki poruszana jest w pracach [4÷6, 11] skupiających się na monitorowaniu stanu w celu poprawy niezawodności, bezpieczeństwa ruchu i dostępności systemów srk. Do wykrywania usterek i diagnostyki uszkodzeń w typowym obwodzie torowym zastosowano rozmyte sieci neuronowe, co opisano w pracy [11]. W artykułach [4÷5] przedstawiono diagnostykę usterek z zastosowaniem sieci Petriego w systemach sygnalizacji kolejowej o stałym odstępie blokowym. W [6] zaproponowano metodę diagnostyki uszkodzeń urządzeń pokładowych sterowania i kontroli jazdy pociągu z zastosowaniem teorii zbiorów przybliżonych.

Jednym z elementów w cyklu życia systemu jest jego walidacja. Etap walidacji obejmuje całościowe sprawdzenie systemu i jest niezbędny do weryfikacji systemu z wymaganiami, założeniami i potwierdza jego bezpieczeństwo. Pozycje literaturowe [7÷10] bezpośrednio odnoszą się do walidacji systemu. Opisują one istotę testowania na etapie jego rozwoju z wykorzystaniem różnych metod zalecanych przez dokumentację normatywną, jak i zawierają propozycje rozszerzenia i modyfikacji zalecanych metod. W [8] 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. W [7], [10] zaproponowano 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 [9] przedstawiono problematykę walidacji

oprogramowania modułu zależnościowego IM i modułu urządzeń zewnętrznych FEC. Zapropozowane środowisko uzupełnia tradycyjne ręczne testy czarnoskrzynkowe i testy wydajności w procesie rozwoju oprogramowania. Do automatycznej walidacji wykorzystywane są skrypty producenta generujące przypadki testowe oprogramowania, a testerzy decydują, które przypadki mają zostać wykonane.

Przedstawione metodologie i narzędzia skupiają się na realizacji wewnętrznych testów, monitorowania stanu urządzeń i diagnostyki z wykorzystaniem modeli opisujących systemy przy zastosowaniu różnych narzędzi i metod. Zaprezentowane w artykule podejście jest odmienne, ponieważ proponowana metoda będzie polegać na badaniu rzeczywistego systemu w warunkach jego faktycznego zastosowania jako całości przy zastosowaniu rzeczywistych sygnałów wymuszających i rzeczywistych reakcji urządzeń.

Brak możliwości realizacji zadań przez system srk pogarsza płynność ruchu, a niekiedy i jego bezpieczeństwo, ponadto generuje koszty i angażuje personel w dodatkowe zadania i procedury. Zauważono, że istnieją czynniki ograniczające dostępność urządzeń do prowadzenia ruchu, a jednym z nich są testy funkcjonalne przeprowadzane podczas realizacji działań utrzymaniowych i naprawczych. W celu zminimalizowania wpływu realizacji procesu użytkowania, a dokładniej wpływu realizacji testów na dostępność urządzeń, opracowano autorską i uniwersalną metodologię wyznaczania testów. Technologia wykonania nie ogranicza zastosowania metody. Dostępne funkcje są takie same (bezpieczne realizowanie poleceń), a jedynie odmienna jest ich realizacja (w logice przekaźnikowej czy mikropocesorowej), co nie wpływa na zastosowanie metodologii, jak również przeznaczenie urządzeń, czy są stacyjne, czy liniowe.

## **2. Urządzenia srk i proces eksploatacji**

Podstawową funkcją systemu srk jest bezpieczne prowadzenie ruchu pociągów poprzez wykluczenie zagrożenia wystąpienia kolizji pojazdów. Urządzenia srk pod względem spełnianych funkcji można podzielić na:

- urządzenia stacyjne (w tym rozrządowe),
- urządzenia liniowe,
- zabezpieczenia ruchu na przejazdach kolejowych,
- urządzenia zdalnego sterowania, kontroli dyspozytorskiej,
- przekazywania informacji tor–pojazd (sygnalizacji kabinowej i ETCS).

Realizacja zależności odbywa się z wykorzystaniem różnych technologii, począwszy od mechanicznych, poprzez elektromechaniczne, przekaźnikowe, elektroniczne i komputerowe (wraz z rozwiązaniami hybrydowymi), a wynika to m.in. z postępu technicznego. Sterowanie realizowane jest za pomocą różnego rodzaju urządzeń zewnętrznych i wewnętrznych. W skład urządzeń zewnętrznych wchodzi sygnalizatory, zwrotnice/wykolejnice, układy kontroli niezajętości torów i rozjazdów, rozmieszczone w odpo-

wiednich miejscach układu torowego. Urządzenia wewnętrzne, będące warstwą zależnościową, realizują i kontrolują prawidłowość warunków do bezpiecznej jazdy poprzez doprowadzenie do wymaganego położenia zwrotnic, kontrolę niezajętości odcinków torowych i zwrotnicowych i wykluczenie jednoczesności realizacji przebiegów sprzecznych. W kolejnictwie polskim znaleźć można wszystkie rozwiązania techniczne urządzeń, podobnie jak w krajach rozwiniętych. Podstawowe funkcje systemów srk stosowanych na świecie są takie same, pomimo różnic w zasadach sygnalizacji.

Urządzenia wprowadzono ze względu na powtarzalność i niezawodność działania w stosunku do człowieka. Aby zapewnić wysoki 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 TFFT (*tolerable functional failure rate*) – dopuszczalny współczynnik utraty funkcji związanej z bezpieczeństwem, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

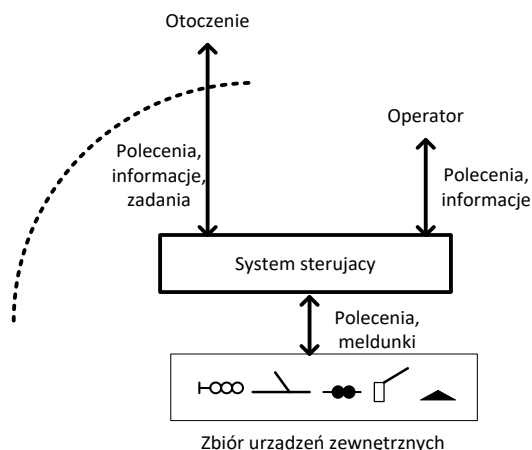
#### Zależność pomiędzy SIL a TFFT

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

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 rys. 1.

System srk jest systemem o rozproszonej strukturze technicznej, realizującym wiele ściśle określonych zadań – przebiegów. Każde zadanie realizowane jest w ściśle określonej konfiguracji funkcjonalnej elementów systemu: zwrotnic, sygnalizatorów, układów kontroli niezajętości. Element należy rozumieć jako zbiór urządzeń i połączeń, np. w skład elementu, którym jest sygnalizator, wchodzi fizyczny semafor, żarówki, transformatory, sieć kablowa zasilająca, karta sterownika wykonawczego urządzeń zależnościowych.

Konfiguracja funkcjonalna stanowi szeregową strukturę. Na czas realizacji określonego przebiegu elementy muszą być dostępne (sprawne i nieobsługiwane) oraz nie mogą być wykorzystywane w realizacji innego zadania. Niedostępność jednego z elementów konfiguracji powoduje jedynie częściowe ograniczenie możliwości realizacji zadań przez system. Zadania, których konfiguracje funkcjonalne nie zawierają niedostępnego elementu, mogą być realizowane bez przeszkód. Uszkodzenie pojedynczego elementu nie ogranicza całkowicie dostępności systemu srk, gdyż jest to system wielozadaniowy, posiadający nadmiar funkcjonalny. Nie oznacza to, że zrealizujemy dokładnie to samo zadanie, np. przyjęcie pociągu na określony tor (określony przebieg). Uszkodzenie komponentu biorącego udział w realizacji tego zadania spowoduje niemożliwość jego realizacji, ale z racji wielozadaniowości systemu srk wykonane zostanie inne zadanie w innej konfiguracji – przyjęcie pociągu na inny tor.



**Rys. 1.** Struktura systemu sterowania ruchem kolejowym

Intuicyjne budowanie planu testów i testowanie urządzeń podczas konserwacji i napraw wpływa na wydłużenie czasu realizacji tych zabiegów, a to negatywnie wpływa na wskaźnik dostępności. Brak jest szczegółowych metod wyznaczania testów, a instrukcje zarządcy infrastruktury (Ie-7, Ie-12) zalecają wykonanie testów podczas realizacji planu diagnostycznego. Podczas realizacji zadań na posterunku ruchu, niektóre funkcje są bardzo rzadko lub w ogóle nieużywane oraz mogą być nieuwzględnione w programie diagnostycznym dla posterunku. Naprawa i testowanie następuje po stwierdzeniu braku realizacji funkcji przez operatora – dyżurnego ruchu lub gdy informacja o usterce zostanie zgłoszona przez system diagnostyki wewnętrznej. Przystępując do naprawy, należy znać lokalizację uszkodzenia. Uszkodzone komponenty niekiedy są lokalizowane od razu, w niektórych przypadkach konieczne jest przeprowadzenie sprawdzeń zawężających zbiorów możliwych uszkodzonych elementów. Po stwierdzeniu uszkodzenia elementu następuje



naprawa właściwa, a po skończonej naprawie przeprowadzane są testy sprawdzające. Testy ponaprawcze czy wynikające z planowanej lub okresowej diagnostyki polegają na sprawdzeniu poprawności realizacji funkcji, w których naprawiany komponent jest elementem konfiguracji zadania. Najprościej ograniczyć wpływ badań na dostępność, realizując je w okresach najmniejszego ruchu pociągów, jednak usterki występują nagle i losowo.

Badaniom diagnostycznym i kontrolnym podlegają wszystkie urządzenia srk, niezależnie od ich funkcji (stacyjne, liniowe, sygnalizacji przejazdowej, ETCS itp), technologii wykonania (mechaniczne, przekaźnikowe, komputerowe) czy stanu technicznego. Oczywiście jest, że im urządzenie jest starsze i bardziej wyeksploatowane, wymaga częstszych zabiegów utrzymaniowych, nierzadko realizowanych poza przyjętymi strategiami. Część urządzeń utrzymywana jest własnymi siłami zarządcy infrastruktury i dotyczy to szczególnie urządzeń wykonanych w starszych technologiach, natomiast urządzenia nowoczesne coraz częściej są obsługiwane wyłącznie przez personel producenta. Istotnym i wspólnym elementem zabiegów utrzymaniowych są próby funkcjonalne urządzeń. Sprawdzeniu podlegają wszystkie funkcje zaimplementowane w urządzeniach pod kątem ich dostępności w systemie, a sprawdzeń dokonuje się podczas realizacji planu diagnostycznego dla określonych urządzeń [1].

Badania kontrolne 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, symulacja zajętości itp.). Działania te powodują ograniczenie dostępności urządzeń do prowadzenia ruchu i wpływają na sytuację ruchową posterunku, co może powodować perturbacje w ruchu pociągów.

Podsumowując, podczas realizacji badań funkcjonalnych urządzeń srk realizowanych po naprawie komponentu lub będących elementem działań utrzymaniowych występują następujące problemy [1]:

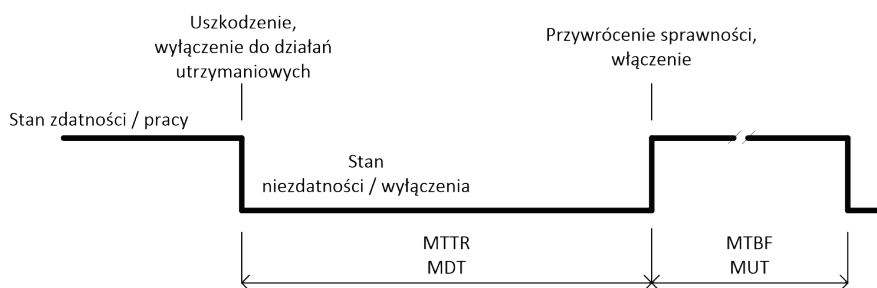
- wpływ testu na sytuację ruchową na posterunku czy szlaku,
- ograniczenie dostępności systemu srk do prowadzenia ruchu,
- zaangażowanie dyżurnego (i dyżurnych sąsiednich posterunków) ruchu do obsługi urządzeń związanej z realizacją testów,
- wpływ sytuacji ruchowej na realizację testów.

### **3. Dostępność urządzeń srk**

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 [3]. W diagnostyce technicznej używa się pojęcia zdatności. Maszyna znajduje się w stanie

zdatności wtedy, gdy 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.



**Rys. 2.** Graficzne zobrazowanie dostępności urządzeń z opisem stanów [opracowanie własne na podstawie PN-EN 50126]

Przedstawiony diagram (rys. 2) definiuje dostępność  $A$  systemu jako część czasu, gdy system prawidłowo realizuje swoje funkcje. Przy założeniu, że średni czas naprawy  $MTTR = MDT$  (czas wyłączenia), dostępność można przedstawić wzorem:

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT} \leq 1 \quad (1)$$

Czas  $MDT$  można zdefiniować jako czas przestoju, czas wyłączenia systemu (jako całość w przypadku usterki jednostki zależnościowej) lub elementu (zwoznicy, sygnalizatora, sekcji licznika osi), w którym system (element) jest w stanie uszkodzenia, planowego obsługiwanego czy konserwacji. Niezależnie od przyczyn, które 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 przedziały 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 i sprawdzeń związanych z obsługą i wspomnianym czasem naprawy.

#### 4. Metoda ograniczenia wpływu badań diagnostycznych na dostępność systemu srk

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 polecenie indywidualne. Wszystkimi funkcjami są więc wszystkie przebiegi i polecenia indywidualne możliwe do zrealizowania na posterunku. Dostępność systemu ze względu na jego cechę wielozadaniowości będzie przyjmować wartości z przedziału  $\langle 0, 1 \rangle$  i odnosi się na daną chwilę szacowania, co przedstawić można wzorem:

$$A_f = \frac{\sum f_{nd}}{\sum f} \quad (2)$$

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.

Ograniczenie czasu poświęconego na wykonanie testów wpłynie pozytywnie na dostępność funkcjonalną systemu. 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:

$$W_{ek} = \frac{\sum f_{ek}}{\sum f} \quad (3)$$

gdzie:

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

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

Zbiór zadań wraz z konfiguracją funkcjonalną – elementami niezbędnymi do jego realizacji wraz z właściwym statusem elementów zaproponowano w [1]. Przeprowadzenie testów funkcjonalnych wykonywanych w trakcie naprawy czy obsługi technicznej wiąże się z nastawieniem konkretnych przebiegów i realizacją poleceń indywidualnych. Aby zminimalizować czas realizacji testów, a co za tym idzie czas naprawy/konserwacji, konieczne jest racjonalne podejście do wyboru zbioru suboptymalnego. Skrócenie czasu wyłączenia urządzenia z konfiguracji spowoduje również zwiększenie wskaźnika dostępności. Można tego dokonać, wybierając zbiór testów do realizacji, wykorzystując zagadnienia znane z diagnostyki i optymalizacji. Zaproponowaną metodologię można rozbudować o elementy optymalizujące koszt realizacji poszczególnych zadań i pokrycie testami sprawdzanych funkcji.

Optymalizację procesu badań funkcjonalnych można podzielić na dwa etapy. Pierwszy z nich polega na utworzeniu zbioru sprawdzeń zawierającego zbiór sprawdzeń niezbędnych koniecznych do określenia stanu zdatowności funkcjonalnej badanych urządzeń. Założeniem tego etapu jest, że każda badana funkcja systemu powinna być sprawdzona co najmniej jeden raz. Drugi etap polega na uporządkowaniu określanego, uprzednio utworzonego zbioru testów pod kątem określonego kryterium.

Optymalny zbiór sprawdzeń wyznaczany jest dla następujących założeń przedstawionych na podstawie [1, 2]:

1. Obiektem kontroli jest zbiór wszystkich funkcji realizowanych przez system srk. Elementami kontrolowanymi są algorytmy sterowania i kontroli poszczególnych urządzeń konfiguracji funkcjonalnej systemu zdefiniowane w zbiorze  $A_i$ .
2. Dostępny jest zbiór sprawdzeń dostępnych  $D_d = \{d_j\}$  wystarczający do kontroli stanu funkcjonalnego.
3. Dla każdego sprawdzenia  $d_j$  istnieje zbiór algorytmów elementarnych. 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 do kontroli stanu funkcjonalnego. Zbiór ten jest zbiorem optymalnym dla określonego kryterium.

Optymalny zbiór sprawdzeń można otrzymać w sposób polegający na wyznaczeniu ze zbioru sprawdzeń dostępnych  $D_d$  sprawdzeń celowych. Sprawdzeniem celowym jest test funkcji lub testy zbioru funkcji. Ogranicza to już na wstępie liczbę testów niepotrzebnych. Następnie należy wyznaczyć sprawdzenia niezbędne i uzupełnić ten zbiór sprawdzeniami dodatkowymi (nadmiarowymi) i zbadać, czy powstały w ten sposób zbiór sprawdzeń jest wystarczający do kontroli stanu funkcjonalnego urządzeń oraz czy wszystkie testowane funkcje mają pokrycie testami. Jeżeli zbiór nie jest wystarczający, należy uzupełnić go o dodatkowe sprawdzenia  $D_{nad}$ . Otrzymany zbiór równocześnie jest optymalizowany pod kątem określonego kryterium. Zgodnie z założeniami tym kryterium jest uogólniony koszt poszczególnych sprawdzeń. Kryterium optymalizacji polega na wyborze sprawdzeń

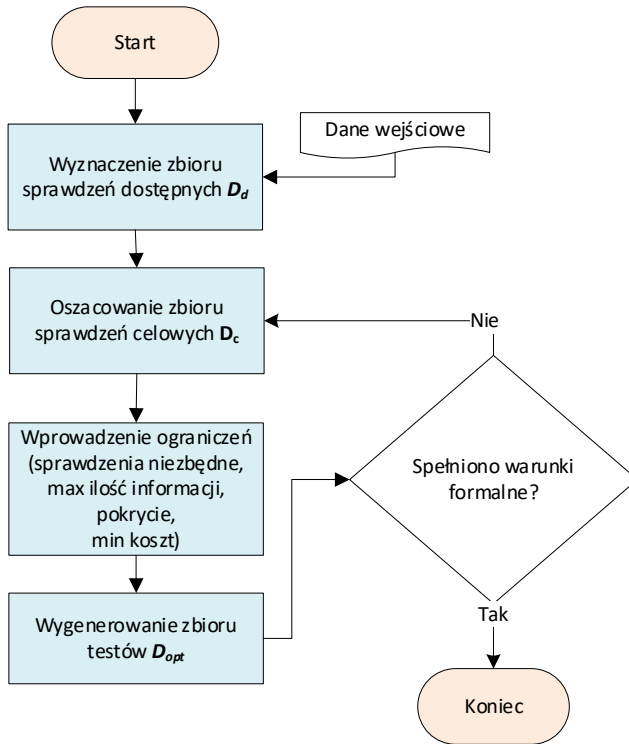
o najniższym koszcie, przy czym wybrane sprawdzenia są wystarczające do kontroli stanu funkcjonalnego.

Czas i koszty dodatkowe związane z doprowadzeniem systemu i jego otoczenia do stanu umożliwiającego realizację określonego testu są znacznie rozbieżne i wynikają z rozwiązań technicznych stosowanych w systemie badanym i systemach powiązanych funkcjonalnie, np. typu blokady, sygnalizacji przejazdowej, rodzaju układów kontroli niezajętości. Uogólnienie kosztów jest uproszczeniem i jest wystarczające do wyznaczania zbioru ze względu na trudności z dokładnym określeniem kosztów realizacji poszczególnych zadań. Wstępnie przyjęto trzy grupy kosztów:

- C0 – realizacja testu nie wymaga symulacji stanu (statusu) komponentów (elementów) badanego systemu i jego otoczenia systemowego (i systemów powiązanych funkcjonalnie),
- C1 – realizacja testu wymaga symulacji stanu (statusu) elementów badanego systemu – przykładowo symulacja zajętości odcinka torowego / zwrotnicowego, ustawienie kierunku blokady,
- C2 – realizacja testu wymaga zmiany stanu (statusu) systemów powiązanych funkcjonalnie.

Ogólny schemat algorytmu wyznaczania optymalnego zbioru sprawdzeń przedstawiono na rys. 3.

Tak przygotowany i wyznaczony zbiór testów pozytywnie wpłynie na wartości współczynnika dostępności funkcjonalnej (3). Mniejsza liczba funkcji będzie niedostępna w wyniku realizacji badań, a co za tym idzie zwiększy się wartość współczynnika  $A_f$ . Zastosowanie metod optymalizacji i zoptymalizowanie zbioru pod kątem przyjętych zdefiniowanych kosztów pozwala na wyznaczenie suboptymalnego zbioru, co ograniczy liczbę testów do wykonania, Wygenerowany zbiór w ten sposób będzie pokrywał wszystkie badane funkcje testami.



**Rys. 3.** Algorytm postępowania przy wyznaczaniu zbioru testów (źródło: opracowanie własne)

## 5. Podsumowanie

Dostępność urządzeń sterowania ruchem kolejowym bez ograniczeń jest warunkiem bezpiecznego i płynnego prowadzenia ruchu pociągów. Działania utrzymaniowe jak naprawa, konserwacja czy diagnostyka urządzeń srk wiążą się z przeprowadzeniem testów sprawdzających. Testy służą sprawdzeniu poprawności realizacji zaimplementowanych funkcji oraz lokalizacji uszkodzeń komponentów. Ograniczenie czasu trwania procesu utrzymania poprzez zmniejszenie liczby i skrócenie trwania testów znacznie wpływa na poprawienie wskaźnika dostępności urządzeń. Zaproponowana autorska metodologia wyznaczania zbioru testów polega na wyborze wyłącznie niezbędnych sprawdzeń, które należy wykonać oraz sprawdzeń o najniższych kosztach ich realizacji. Brak sprawdzeń nadmiarowych, powielających informacje o stanie funkcjonalnym obiektu oraz wybieranie sprawdzeń o najniższych kosztach generuje suboptymalny zbiór testów, którego realizacja będzie miała najmniejszy wpływ na dostępność urządzeń.

## 6. Literatura

1. Drózd P., Rosiński A., Konopiński L.: Badania funkcjonalne urządzeń sterowania ruchem kolejowym. *Problemy Kolejnictwa*, tom 64, zeszyt 186, 2020, DOI: 10.36137/1863P.
2. Drózd P.: Analiza właściwości funkcjonalno - diagnostycznych urządzeń srk. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, nr 113, 2016.
3. Norma PN-EN 50126:2018 Zastosowania kolejowe. Specyfikowanie i wykazywanie Niezawodności, Dostępności i Podatności utrzymaniowej i Bezpieczeństwa (RAMS) (część 1 i 2).
4. Durmus M., Takai S., Soylemez, M.: Fault Diagnosis in Fixed-Block Railway Signaling Systems: A Discrete Event Systems Approach. *Transactions on Electrical and Electronic Engineering IEEJ Trans*, 9, 2014. DOI: 10.1002/tee.22001
5. Durmus M.S., Ustoglu I., Tsarev R. Z., Schwarz M.: Modular Fault Diagnosis in Fixed-Block Railway Signaling Systems. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, issue 3, 2016, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.077
6. Feng J., Zhang J., Cai B.: Fault Diagnosis Method of the On-board Equipment of Train Control Systems Based on Rough Set Theory. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317955
7. Jidong Lv, Haifeng Wang, Hongjie Liu, Lu Zhang.: A Model-based Test Case Generation Method for Function Testing of Train Control Systems. *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation, ICIRT 2016*. DOI: 10.1109/ICIRT.2016.7588752
8. Magott J., Lewiński A., Perzyński, T.: Semi-formal methods in safety railway control systems validation. *Archives of Transport System Telematics*, Volume 6, Issue 1, 2013.
9. 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, 2002. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002*. DOI: 10.1007/3-540-47833-7\_37.
10. Nicola G., Tommaso P., Esposito R., Flammini F., Orazio A.: A Hybrid Testing Methodology for Railway Control Systems, *SAFECOMP 2004: Computer Safety, Reliability, and Security*, DOI: 10.1007/978-3-540-30138-7\_11
11. Sandidzadeh M. A., Dehghani M.: Intelligent condition monitoring of railway signaling in train detection subsystems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Volume 24, Issue 4, 2013. DOI: 10.3233/IFS-2012-0604.

