

Łukasz WOLNIEWICZ

Wrocław University of Science and Technology (Politechnika Wroclawska)

## LITERATURE REVIEW ON THE RAIL TRANSPORT SCHEDULE ROBUSTNESS

### Przegląd stanu wiedzy z zakresu odporności harmonogramów w transporcie szynowym

**Abstract:** *The article presents issues concerning rail transport (rail, metro and tramway) and factors influencing the planned implementation of the schedule. At the beginning, the scope of application of the robustness concept was analysed, based on scientific and industry literature. Then the attention was focused on the model of the rail transport system and the schedule, the basic indicator of robustness assessment was discussed, taking into account the methods of analysis used and many variables occurring in rail transport. Finally, a review of the state of knowledge is summarised and the most important observations from the analysis are indicated. In the case of a robust schedule there is no propagation of disruption across the network after an adverse event has occurred.*

**Keywords:** robustness, timetable, train delays, transport, management, planning

**Streszczenie:** *W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące transportu szynowego (kolei, metra i tramwajów) i czynników mających wpływ na planową realizację harmonogramu. Na początku przeanalizowano zakres stosowania pojęcia „odporność”, bazując na literaturze naukowej i branżowej. Następnie skupiono uwagę na modelu systemu transportu kolejowego i harmonogramie, omówiono podstawowe wskaźnik oceny odporności z uwzględnieniem stosowanych metod analizy i wielu zmiennych występujących w transporcie kolejowym. Na końcu podsumowano przegląd stanu wiedzy i wskazano najważniejsze spostrzeżenia z analizy. W przypadku odpornego harmonogramu nie następuje propagacja zakłóceń w całej sieci po wystąpieniu zdarzenia niepożądanego.*

**Słowa kluczowe:** odporność, rozkład jazdy, opóźnienia pociągów, transport, zarządzanie, planowanie

## **1. Introduction**

Current problems on railways in the context of punctual driving are: incorrectly schedule, late giving of departure signal, damage to infrastructure equipment, damage to communication equipment, damage to contact line power supply equipment, extended travel time due to track operations, speed limits and closures due to infrastructure condition, primary and secondary delays, location of passengers (increased number of passengers), limited capacity of routes and stations, human factor in terms of decisions taken and work organisation, need for intervention of services on the train, theft and devastation, communications, unplanned loading activities, late notification of ready for departure, substitution of teams, poor technical condition of rolling stock, accidents, weather conditions, damage to rolling stock. In case of a robust schedule, there is no propagation of delays across the network. The correct handling of time reserves is a multi-dimensional issue. Increasing time reserves also increases robustness, but network capacity decreases. Schedules should be developed in a way that guarantees the best use of working time of people and equipment, capacity of railways used by different carriers and robustness of the rail transport system to disturbances [10, 11, 12, 24, 26].

The aim of this publication is to explore the problem of schedule robustness in rail transport, including: different ways of defining the concept of "robustness", a multi-parametric model of the rail transport system and the indicators used to assess schedule robustness. Additional parameters taken into account by the author are also included in the analysis.

## **2. Robustness in rail transport**

The term robustness is used in various fields of science, including medicine, materials science and management. In management, "robustness" has been introduced by modern decision making theories (developed in the 1950s) and analysis of undesirable scenarios and the Maximin Wald model as a tool to prevent unstable cases [2].

The authors [8, 13] treat the terms "system resilience" and "system robustness" in the same way. The term "resilience" should be considered only after the occurrence of an undesirable event as the time of system recovery when corrective actions, e.g. reorganisation of the schedule, are carried out in order to mitigate the effects of the disruption. The concept of "robustness" does not assume fundamental changes as a response to a disturbance and is defined by the correct operation of the system as a result of the disturbance.

The literature contains various definitions of robustness related to components of the rail transport system, inter alia:

- unexpected problems can be dealt with without significant schedule modifications [30],
- the schedule is robust when delays from one period do not spread to the next [9],
- tolerance for a degree of uncertainty [21],

- maximum initial delay that can occur without causing interference to other vehicles [27],
- ability of a schedule to resist design errors, changes in parameters and operating conditions [3],
- the percentage of interferences smaller than the specified unit of time that the timetable can tolerate without any current modifications [19],
- the schedule may return to the initial stage unchanged by the disruption within a limited time period [19],
- the parameter of railroad robustness to brittle fractures, determined during laboratory testing of samples [33],
- requirements for robustness of railway ballast aggregates to abrasion, crushing, weathering, frost robustness [32],
- parameters determining the minimum robustness of railway equipment to lightning currents and surges [36],
- requirements for systems of non-hot light sources for railway signal lanterns concerning robustness to: phantom effect, humidity, voltage variability, electric shocks, vibrations [35],
- requirements for passenger information systems concerning robustness of devices to cold, hot, vibrations, mechanical strokes, electrostatic discharges, electromagnetic fields, manual attack, impacts, sinusoidal vibrations [37],
- the requirements for architectural passenger service facilities, i.e.: fire robustness, vandalism robustness, impact robustness [34],
- requirements for overhead contact line [38].

### 3. Indicators for assessing robustness

Indicators for evaluation of the robustness of the rail transport system have been grouped according to components (1) of the formal model of rail transport system  $S$  [20]:

$$S = \{T, N, RS, TT, P, F, EE, RE\} \quad (1)$$

where:

$T$  – time, as a function of states of system elements in time.

$N$  – railway network,

$RS$  – rolling stock,

$TT$  – timetable,

$P$  – passengers,

$F$  – freight,

$EE$  – external companies having an influence on the state of the railway network,

$RE$  – random events.

All these parameters are factors that affect the robustness of the schedule, the following assignment has been made:

- railway network: infrastructure repairs, infrastructure damage, accidents,
- weather conditions,
- rolling stock: damage to the rolling stock,
- timetable/time: critical points in the timetable, time reserves,
- quality, number of trains,
- passengers/workers: human factor.

The literature review related to methods of assessing the robustness of the rail transport system was compared with the model of the railway network [20], thus assigning the assessed aspects to the parameters of the railway network (fig. 1).

The first of the parameters of the assessment of the robustness of the rail transport operation system concerns infrastructure overhauls. The publication [5] takes into account the costs of maintenance, speed limits, but does not take into account the impact of overhaul on the robustness of the schedule. This is indicated by the lack of implementation of costs of adverse events in the model. Perhaps they were taken into account indirectly in the average annual costs.

For the assessment of damage to railway infrastructure [23], Failure mode and effects analysis (FMEA) analysis is used, taking into account the following factors: poor condition of sleepers, crack and breakage of the rail, lack of attachment of the rail to the sleeper, rail fatigue, a place in the track badly dehydrated, where there is local, small collapse of the track, change of rail spacing, rail wear. FMEA analysis allows you to inventory the types and effects of possible errors. It can prevent the effects of faults at the scheduling stage. However, it does not provide information about the necessary buffer times associated with archived infrastructure damage data on a given type of line, which could affect the system robustness in real time.

In [25] a tree of incapability to model the process of a railway accident understood as a serious accident was used, therefore accidents with pedestrians and accidents with cars were not included. These events are included in the damage of crossings or passages, although sometimes they end up with many months' decommissioning of the locomotive. Among the most serious accidents are collisions and derailments in line traffic. An analysis of the unfitness tree was used to model the process of a railway accident, which was used, for example, to assess the safety of level crossings. Another author [7] assesses the robustness of the rail transport operation system in terms of accidents using a relationship that takes into account: expected number of accidents during 5 years, average daily train traffic, average annual train traffic, coefficient taking into account the presence of warning devices, additional parameter concerning railway traffic control devices. The accident prediction model has been developed on the basis of archival data from 29 US states on level crossing accidents. Robustness of the rail transport operation system to accidents can be classified by the type of accident [15] using the number of dangerous situations, events, accidents involving injured and injured persons, and fatal accidents. Accident related models take into account actual data such as the archived number of accidents in recent

years, the average daily and annual traffic by which the indicator can potentially be assigned to a railway line with a specific load and parameters related to warning and traffic control equipment. However, the two analytical models do not break down accidents into consequence-related types and impact on the timely implementation of the timetable. For this reason, the result obtained is difficult to interpret and ambiguous.

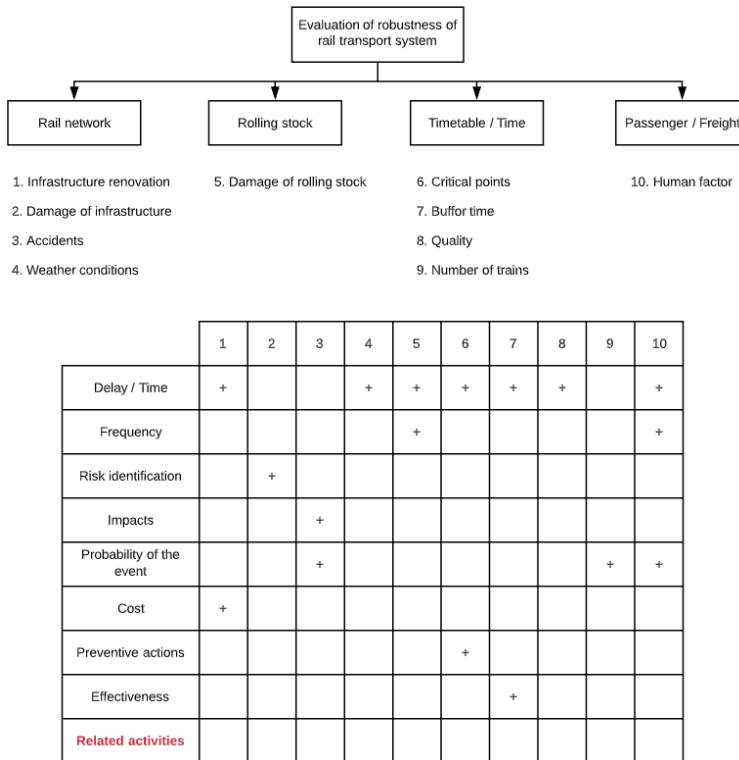


Fig. 1. Parameters of robustness evaluation of rail transport systems in the literature

Another evaluated parameter is atmospheric conditions [4]. There are no precise weather forecasts for individual station points but only general for the region, which makes forecasting difficult. The authors [17] assess the robustness due to weather conditions by classifying weather types and depending on this average delay time. The authors of the models noticed an increase in delays in case of worsening weather conditions. In the first model there is no precise weather type classification. In both models there is no breakdown of weather type with delay depending on the type of route. The tests were carried out on the example of a selected railway line and cannot be used as a criterion for the construction of the timetable due to the different characteristics of the equipment, speed, capacity, infrastructure condition, traction. They should be repeated for the individual route under consideration.

Another parameter is related to the damage to the rolling stock. The publication [29] takes into account the variables: time spent on a vehicle in an unfit condition, time spent on a vehicle in an unfit condition due to current services, time spent on a vehicle in an unfit condition due to preventive services, sample size of vehicles taken for testing. Defects shall be classified into those that allow further driving and those that prohibit it. In [31], however, damage to rolling stock is assessed using the average intensity of fleet failure formula. Two groups can be distinguished from among many methods of increasing the assessment of robustness and reliability: preoperational methods, operational methods. The first group can be used only in the phase of vehicle development, contouring and production. With these methods it is not possible to improve the reliability of the final product without affecting its design (without modernisation). The second group of methods can be used during operation even if such methods were not foreseen during the development process.

The authors [19] point out the following factors as features influencing the robustness of schedules:

- buffer time,
- the number of trains on the timetable,
- number of stops and stations,
- passenger flow,
- the longest single-track sections.

The first of the assessed timetable parameters for robustness are critical points. According to [1], one of the basic challenges is to assess its robustness and to determine strategies to reduce its sensitivity to interference. The most popular way is to analyze the schedule in terms of interval capacity and eliminate critical points. Existing robustness measures are useful when comparing different schedules with respect to their robustness. However, they are not so useful as to suggest directly where improvements should be made. In the article, the authors propose a new indicator taking into account the critical concept. It is defined as the inverse of the sum of the shortest distance differences between vehicles. This concept allows to find weak points in the schedule. In order to quantify how critical a point is, the reliability of critical points is determined. The authors in the article [28] present one of the methods of improving the quality of railway traffic is to build a reliable schedule in which trains will be able to both compensate for delays and deviations from the planned arrival time. Studies show that the robustness indicator at a critical point can be used to increase stability of the timetable.

Another of the parameters used to evaluate the timetable for robustness is time reserves (buffer). Authors [14] using *WADI* (2) dependency check the distribution of time reserves included in the timetable on the analyzed railway line. The even distribution of reserves facilitates the process of regaining punctuality after a disturbance on a section, and not only within station points.

$$WAD1 = \sum_{t=1}^N \frac{2t-1}{2N^2} \cdot s_t \quad (2)$$

where:

$t$  – section number [-],

$s_t$  – time reserve for  $i$ -th section [s],

$N$  – number of sections on the railway line [-].

The WAD is a relative number between 0 and 1, where  $WAD = 0.5$  means that the same amount of margin is placed in the first half of the line, as in the second half, where a WAD less than 0,5 means that a larger margin is placed in the first half. The same authors also assess time reserves using the weighted average length of buffer times. The time buffer included in the schedule is unfavourable for travelers. However, it increases the robustness of the system to interference. Therefore, a  $WAD2$  coefficient was introduced (3). This is the weighted average distance of the buffer times added to the travel time. The measure is intended to indicate the extent to which the buffer affects the train's arrival at the terminal station and departure from the initial station.

$$WAD2 = \frac{1 \sum_{i=0}^N i \cdot s_i}{N \sum_{i=0}^N s_i} \quad (3)$$

where:

$s_i$  – buffer time,

$i$  – the weight of the railroad section,

$n$  – number of sections.

The parameter of timetable robustness assessment related to the quality of transport understood as travel time was defined by the authors [18]. In the approach integrating the route and passenger exchange at the station, the measure of robustness is defined as  $WTTE$  (4).

$$WTTE = \frac{r_t - n_t}{n_t} \quad (4)$$

where:

$r_t$  – real time of passenger journey [min],

$n_t$  – nominal travel time [min].

The publication [19] presents the method of evaluating the robustness of railway schedules by adding up the number of trains on a route as a measure of robustness. With an increase in the number of trains running within a timetable, the probability of disturbance increases. Fewer number of trains means higher robustness. However, the authors do not differentiate this parameter depending on the type of railway line traffic control equipment.

Another evaluated parameter is the influence of human factor on the robustness of rail transport operation system. The authors' approach [16] is related to the influence of time of locating passengers at the station. The model of the system of mass service takes into account the variability of the intensity of the requests, and the possibility of variability of

the service stream is allowed. However, the authors [6] analyse the influence of the human factor in terms of making mistakes by employees. The model is used to determine the probability of human error during schedule reorganization.

The publications on rail transport issues do not show robustness approaches related to: recovery time after a disturbance, response time to disturbance, frequency of system analysis and evaluation of related activities (process continuity). Examples of dependent activities in rail transport are train connections at stations and train crew transfers. Depending on the number of scheduled transfers, system dependencies should be taken into account (scale of service, path load). The problem of robustness in relation to dependent activities has been marked only in one publication related to the processes of use [22] by adding up their number. Due to the specific nature of rail transport closely related to the infrastructure, this approach is insufficient in the assessment of system robustness. The authors mainly focus on time interruptions, i.e. situations where the journey takes longer than expected without giving a reason or the start time is delayed.

## **4. Conclusion**

The literature review has shown that the robustness of a rail transport system depends on many variables, including random events. However, it is often directly associated with the robustness of the schedule (timetable, work plan), which results from the need to ensure the punctuality of traffic and the fulfilment of transport contract conditions by the carrier and the railway network manager.

There are various methods in the literature to assess the robustness of the rail transport system and schedule, which take into account, among other things: repairs and damage to infrastructure, accidents, weather conditions, damage to rolling stock, critical points in the timetable, time reserves, travel time, number of trains on a section and human factors related to the time of locating passengers in stations. This proves that creating a timetable that is robustness to a number of these undesirable factors is not an easy task.

## **5. References**

1. Andersson E.V., Peterson, A., Törnquist Krasemann J.: Quantifying railway timetable robustness in critical points. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 3, 2013, DOI: 10.1016/j.jrtpm.2013.12.002.
2. Bertsimas D., Sim M.: The Price of Robustness. *Operations Research*, Vol. 52, No. 1, 2004, DOI: 10.1287/opre.1030.0065.
3. Bešinovic N., Rob M.: An integrated micro-macro approach to robust railway timetabling. *Transportation Research*, Vol. 87, part B, 2016, DOI: 10.1016/j.trb.2016.02.004.



4. Briggs K., Beck C.: Modelling train delays with q-exponential functions. *Statistical Mechanics*, 378, 2007, DOI 10.1016/j.physa.2006.11.084.
5. Enzi M.: Der optimale Re-Investitionszeitpunkt für das Gleis unter dem Aspekt der Lebenszykluskosten. *ZEV Rail*, 3/2012.
6. Evans A.W., Verlander N.Q.: Estimating the consequences of accidents: the case of automatic train protection in Britain. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 28, 1996, DOI: 10.1016/0001-4575(95)00057-7.
7. Federal Highway Administration: *Railroad-Highway Grade Crossing Handbook*, second ed. FHWA-TS-86-215. Springfield, Virginia: NTIS, 1986.
8. Goverde R.M.P., Hansen I.A.: Performance indicators for railway timetables. *Intelligent Rail Transportation Proceedings*, Beijing 2013.
9. Goverde R.: Railway timetable stability analysis using max-plus system theory. *Transportation Research*, 41, 2006, DOI: 10.1016/j.trb.2006.02.003.
10. Jacyna M., Golebiowski P.: An approach to optimizing the train timetable on a railway network. *WIT Transactions on The Built Environment*, 146, 2015, DOI: 10.2495/UT150571.
11. Jacyna M., Golebiowski P.: Traffic organization on the railway network and problem of construction of graphic train timetable. *Journal of KONES. Powertrain and Transport* 22, DOI: 10.5604/12314005.1165399.
12. Jacyna M., Gołębiowski P., Krześniak M., Szkopiński J.: *Organizacja ruchu kolejowego*. PWN, Warszawa 2019.
13. Keisuke I., Norio T.: An algorithm to make a resilient timetable. *International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, France, 2017.
14. Kroon L.G., Dekker R., Vromans M.: Cyclic railway timetabling: A stochastic optimization approach. 4359, pp. 41–68, Springer-Verlag, Berlin 2007.
15. Kyriakidis M., Hirsch R., Majumdar A.: An analysis of accident precursors. *Safety Science*, 50, 2012.
16. Leszczyński J.: *Modelowanie symulacyjne w transporcie kolejowym*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1973.
17. Ling X., Peng Y., Sun S., Wang P.: Uncovering correlation between train delay and train exposure to bad weather. *Physica A* 512, 2018, DOI: 10.1016/j.physa.2018.07.057.
18. Lusby R., Larsen J., Bull S.: A survey on robustness in railway planning. *European Journal of Operational Research*, 26, 2018, DOI: 10.1016/j.ejor.2017.07.044.
19. Miguel A., Barber F., Ingolotti L.: Robustness in Railway Transportation Scheduling, 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, DOI: 10.1109/WCICA.2008.4594481.
20. Penicka M.: *Towards a Theory of Railways*. PhD Thesis, Czech Technical University and Technical University of Denmark, 2006.
21. Policella N., Smith S., Cesta S., Oddi A.: Generating Robust Schedules through Temporal Flexibility. *ICAPS'04*, Canada 2004.
22. Policella N.: *Scheduling with uncertainty: a proactive approach using partial order schedules*. PhD thesis, Università degli Studi di Roma, 2005.

23. Price C., Pragh D., Wilson M., Snooke N.: The flame system: automating electrical failure mode and effects analysis. Proc Reliab Maintain Symp, 1995.
24. Restel F.J.: Concept of railway transportation system resilience. Safety and reliability of complex engineered systems, CRC Balkema, 2015.
25. Restel F.J.: Model niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego. PhD thesis, Wrocław University of Science and Technology, 2014.
26. Restel F.J.: Train punctuality model for a selected part of railway transportation system. Safety, reliability and risk analysis, CRC Balkema, 2014.
27. Schöbel A., Kratz A.: A bicriteria approach for robust timetabling. Springer, 2009, DOI: doi.org/10.1007/978-3-642-05465-5\_5.
28. Solinen E., Nicholson G., Peterson A.: A microscopic evaluation of railway timetable robustness. JofRTP&M 2017, DOI: 10.1016/j.jrtpm.2017.08.005.
29. Szkoda M., Lorenc A.K.: Analiza gotowości i niezawodności taboru kolejowego z uwzględnieniem rezerwy eksploatacyjnej. Pojazdy Szynowe, No. 3, 2014.
30. Takeuchi Y., Tomii N.: Robustness indices for train rescheduling. International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Delft 2005.
31. Vaičiūnas G., Bureika G.: Approach modelling of constant interfailure process of renewal multi-unit fleet. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 16 (3), 2014.
32. Warunki techniczne wykonania i odbioru podsypki tłuczniowej naturalnej i recyklingu stosowanej w nawierzchni kolejowej Id-110, Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. of 13.12.2016.
33. Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Szyn Kolejowych - Wymagania i badania Id-106, Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. of 5.03.2019.
34. Wymagania architektoniczne dla kolejowych obiektów obsługi podróżnych, Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. of 27.12.2018.
35. Wymagania dla układów niezarowego źródła światła latarni sygnałowych sygnalizatorów kolejowych, Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. of 18.12.2018.
36. Wymagania techniczne dla zapewnienia ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym, przed przepięciami i od wyładowań atmosferycznych w strefie oddziaływania sieci trakcyjnej DC 3 JV let-120, Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. of 12.06.2018.
37. Wymagania w sprawie elementów wykonawczych Centralnego Systemu Dynamicznej Informacji Pasażerskiej i Infrastruktury towarzyszącej, Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. of 18.12.2018.
38. Wytyczne projektowania, budowy i odbioru sieci trakcyjnej, Management Board of PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. of 10.05.2010.

# **PRZEGLĄD STANU WIEDZY Z ZAKRESU ODPORNOŚCI HARMONOGRAMÓW W TRANSPORCIE SZYNOWYM**

## **1. Wprowadzenie**

Aktualnymi problemami na kolei w kontekście punktualnego prowadzenia ruchu są: nieprawidłowo opracowany harmonogram, późne podanie sygnału odjazdu, uszkodzenia urządzeń infrastruktury, uszkodzenia urządzeń łączności, uszkodzenia urządzeń zasilania sieci trakcyjnej, wydłużony czas jazdy ze względu na prowadzone roboty torowe, ograniczenia prędkości i zamknięcia ze względu na stan infrastruktury, opóźnienia pierwotne oraz wtórne, lokowanie podróży (zwiększona liczba pasażerów), ograniczona przepustowość szlaków i stacji, czynnik ludzki w zakresie podejmowanych decyzji i organizacji pracy, konieczność interwencji służb w pociągu, kradzieże i dewastacje, skomunikowania, nieplanowane czynności załadunkowe, późne zgłoszenie gotowości do odjazdu, podmiany drużyn, zły stan techniczny taboru, wypadki, warunki atmosferyczne, uszkodzenia taboru. W przypadku odpornego harmonogramu nie następuje propagacja opóźnień w całej sieci. Prawidłowe postępowanie z rezerwami czasowymi jest kwestią wielowymiarową. Zwiększenie rezerw czasowych zwiększa również odporność, lecz przepustowość sieci maleje. Harmonogramy należy opracowywać w sposób gwarantujący najlepsze wykorzystanie czasu pracy osób i sprzętu, przepustowości dróg kolejowych użytkowanych przez różnych przewoźników i odporności systemu transportu szynowego na zakłócenia [10, 11, 12, 24, 26].

Celem publikacji jest przybliżenie problemu odporności harmonogramów w transporcie szynowym, z uwzględnieniem: różnych sposobów definiowania pojęcia „odporność”, wieloparametrycznego modelu systemu transportu kolejowego i stosowanych wskaźników oceny odporności harmonogramu. W analizie uwzględniono również dodatkowe parametry uwzględniane przez autora.

## **2. Zakres stosowania pojęcia odporności**

Pojęcie „odporność” (ang. *robustness*) stosowane jest w różnych dziedzinach nauki, m.in. w medycynie, materiałoznawstwie, zarządzaniu. W zarządzaniu „odporność” została wprowadzona przez nowoczesne teorie podejmowania decyzji (opracowane w latach 50.

XX wieku) i analizy niepożądanych scenariuszy oraz model Maximina Walda jako narzędzie do zapobiegania przypadkom niestabilnym [2].

Autorzy pracy [8, 13] traktują w sposób jednaki pojęcia *system resilience* i *system robustness*, które w tłumaczeniu oznaczają „odporność systemu”. Tymczasem *resilience* powinno być rozpatrywane dopiero po wystąpieniu zdarzenia niepożądanego, jako czas powrotu do prawidłowego działania (ang. *system recovery*) przy realizacji działań korygujących, np. reorganizacji harmonogramu, w celu zniwelowania skutków zakłóceń. Koncepcja *robustness* nie zakłada fundamentalnych zmian jako odpowiedź na zakłócenia i jest definiowana poprzez prawidłowe działanie systemu mimo zakłóceń.

W literaturze można znaleźć różne definicje odporności związane z elementami składowymi systemu transportu kolejowego, m.in:

- możliwość poradzenia sobie z nieoczekiwanymi problemami bez znaczących modyfikacji harmonogramu [30],
- harmonogram jest odporny, gdy opóźnienia z jednego okresu nie rozprzestrzeniają się na kolejny okres [9],
- tolerancja dla pewnego stopnia niepewności [21],
- maksymalne początkowe opóźnienie możliwe do wystąpienia bez powodowania zakłóceń innych pojazdów [27],
- zdolność harmonogramu do absorbowania błędów projektowych, zmian parametrów i warunków operacyjnych [3],
- odsetek zakłóceń mniejszych niż określona jednostka czasu, którą rozkład jazdy jest w stanie tolerować bez jakichkolwiek bieżących modyfikacji [19],
- harmonogram może powrócić do początkowego etapu niezmiennego zakłóceniem w ograniczonym czasie [19],
- parametr odporności szyn kolejowych w zakresie kruchych pęknięć, wyznaczany podczas badania laboratoryjnego próbek [33],
- wymagania odporności kruszyw podsypki kolejowej na ścieranie, rozdrabnianie, działanie czynników atmosferycznych, mrozoodporność [32],
- parametry określające minimalną odporność urządzeń kolejowych na oddziaływanie prądów piorunowych i przepięć [36],
- wymagania dla układów niezarowego źródła światła latarni sygnałowych sygnalizatorów kolejowych dotyczące odporności na: efekt fantomowy, wilgoć, zmienność wartości napięcia, udary elektryczne, drgania [35],
- wymagania systemów informacji pasażerskiej w zakresie odporności urządzeń na zimno, gorąco, wibracje, udary mechaniczne, wyładowania elektrostatyczne, pola elektromagnetyczne, ręczny atak, uderzenia, wibracje sinusoidalne [37],
- wymagania dotyczące architektonicznych obiektów obsługi podróżnych, tj.: odporność ogniowa, odporność na wandalizm, odporność na uderzenia [34],
- wymagania dla sieci trakcyjnej [38].

### 3. Wskaźniki oceny odporności

Analiza oceny odporności systemu transportu szynowego została przeprowadzona na bazie modelu systemu transportu kolejowego  $S$  opisanego w [20], poszerzonego o wpływ podmiotów zewnętrznych mających wpływ na stan sieci kolejowej i zdarzenia losowe:

$$S = \{T, N, RS, TT, P, F, EE, RE\} \quad (1)$$

gdzie:

$T$  – czas jako funkcja stanów elementów systemu w czasie,

$N$  – sieć kolejowa,

$RS$  – tabor,

$TT$  – rozkład jazdy,

$P$  – pasażerowie,

$F$  – towary,

$EE$  – podmioty zewnętrzne mające wpływ na stan sieci kolejowej,

$RE$  – zdarzenia losowe.

Wszystkie te parametry są czynnikami wpływającymi na odporność harmonogramu. Dokonano następującego przyporządkowania na podstawie (1):

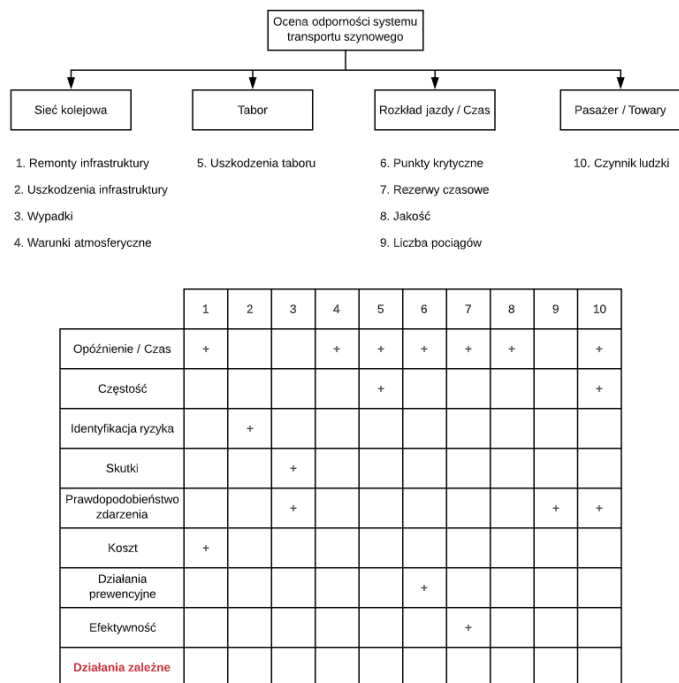
- sieć kolejowa: remonty infrastruktury, uszkodzenia infrastruktury, wypadki, warunki atmosferyczne,
- tabor: uszkodzenia taboru,
- rozkład jazdy/czas: punkty krytyczne w rozkładzie jazdy, rezerwy czasowe, jakość, liczba pociągów,
- pasażerowie, pracownicy, towary: czynnik ludzki, czas lokowania, załadunku.

Przegląd literatury dotyczący metod oceny odporności systemu transportu szynowego zestawiono z modelem sieci kolejowej [20], przyporządkowując w ten sposób oceniane aspekty do parametrów sieci kolejowej (rys. 1).

Pierwszy z parametrów oceny odporności systemu eksploatacji transportu szynowego, który zostanie opisany, dotyczy remontów infrastruktury. W publikacji [5] uwzględniono koszty obsługi technicznej, ograniczeń prędkości, jednak nie uwzględniono wpływu remontu na odporność harmonogramu. Wskazuje na to brak implementacji kosztów zdarzeń niepożądanych do modelu. Być może uwzględniono je w sposób pośredni w kosztach średnich rocznych.

Do oceny uszkodzeń infrastruktury [23] kolejowej wykorzystywana jest analiza rodzajów i skutków możliwych błędów (FMEA) uwzględniająca następujące czynniki: zły stan podkładów, pęknięcie i złamanie szyny, brak przytwierdzenia szyny do podkładu, zmęczenie szyny, wychłap (miejsce w torze źle odwodnione, gdzie występuje miejscowe, małe zapadanie się toru), zmiana rozstawu szyn, zużycie szyn. Analiza FMEA pozwala na inwentaryzację rodzajów i skutków możliwych błędów. Może ona pozwolić na zapobieganie skutkom wad na etapie planowania rozkładu jazdy. Nie daje jednak informacji o koniecznych do zaplanowania czasach buforowych, związanych z archiwalnymi danymi

o uszkodzeniach infrastruktury na linii danego typu, co w czasie rzeczywistym mogłoby wpłynąć na odporność systemu.



**Rys. 1.** Parametry uwzględniane w ocenie odporności systemów transportu szynowego

W pracy [25] użyto drzewa niezdatności do modelowania procesu wystąpienia wypadku kolejowego rozumianego jako poważny wypadek, dlatego nie uwzględniono wypadków z pieszymi oraz wypadków z samochodami. Te zdarzenia wliczane są do uszkodzeń przejazdów lub przejść, chociaż czasami kończą się wielomiesięcznym wyłączeniem lokomotywy z eksploatacji. Spośród wypadków najpoważniejsze są kolizje i wykolejenia w ruchu liniowym. Do zamodelowania procesu wystąpienia wypadku kolejowego wykorzystano analizę drzewa niezdatności, która stosowana była np. do oceny bezpieczeństwa przejazdów kolejowych. Kolejny z autorów [7] ocenia odporność systemu eksploatacji transportu szynowego pod kątem wypadków, wykorzystując zależność uwzględniającą: przewidywaną liczbę wypadków w ciągu 5 lat, średni dzienny ruch pociągów, średni roczny ruch pociągów, współczynnik uwzględniający obecność urządzeń ostrzegawczych, dodatkowy parametr dotyczący urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Model przewidywania wypadków został opracowany na podstawie archiwalnych danych z 29 stanów USA o wypadkach na przejazdach kolejowo-drogowych. Odporność systemu eksploatacji transportu szynowego na wypadki można sklasyfikować ze względu na typ wypadku [15], wykorzystując liczbę wystąpienia sytuacji niebezpiecznych, zdarzeń, wypadków z udziałem osób poszkodowanych i rannych oraz wypadków ze skutkiem

śmiertelnym. Modele związane z wypadkami uwzględniają rzeczywiste dane, takie jak: archiwalna liczba wypadków w ciągu ostatnich lat, średni dzienny i roczny ruch, dzięki któremu potencjalnie można przypisać wskaźnik do linii kolejowej o określonym obciążeniu oraz parametry związane z urządzeniami ostrzegawczymi i urządzeniami sterowania ruchem. W dwóch modelach analitycznych nie podzielono jednak wypadków na typy związane ze skutkami oraz z wpływem na punktualną realizację rozkładu jazdy. Z tego powodu otrzymany wynik jest trudny do interpretacji i niejednoznaczny.

Kolejnym ocenianym parametrem są warunki atmosferyczne [4]. Nie ma dokładnych prognoz pogody dla poszczególnych punktów stacyjnych, tylko ogólne dla regionu, co utrudnia prognozowanie. Autorzy [17] oceniają odporność ze względu na warunki atmosferyczne poprzez klasyfikację typów pogody i uzależnienie od tego średniego czasu opóźnienia. Zauważono zwiększenie opóźnień w przypadku pogarszających się warunków atmosferycznych. W pierwszym modelu nie ma dokładnego podziału na typ pogody. W obu modelach brakuje zestawienia typu pogody z opóźnieniem w zależności od typu szlaku. Badania przeprowadzono na przykładzie wybranej linii kolejowej i nie można ich wykorzystać jako kryterium przy konstrukcji rozkładu jazdy, ze względu na różną specyfikę urządzeń sterowania ruchem, prędkość, przepustowość, stan infrastruktury, trakcję. Należałoby powtórzyć je dla rozważanego indywidualnie szlaku.

Kolejny z parametrów związany jest z uszkodzeniami taboru. W publikacji [29] uwzględniono zmienne: czas przebywania pojazdu w stanie zdadności, czas przebywania pojazdu w stanie niezdadności z powodu obsługi bieżących, czas przebywania pojazdu w stanie niezdadności z powodu obsługi profilaktycznych, licznosc próby pojazdów pobranych do badań. Uszkodzenia klasyfikowane są na takie, które umożliwiają dalszą jazdę i takie, które jej zakazują. Natomiast w [31] uszkodzenia taboru są oceniane z wykorzystaniem formuły średniej intensywności awarii floty. Spośród wielu metod podwyższania oceny odporności i niezawodności można wyróżnić dwie: metody przedeksploatacyjne i eksploatacyjne. Pierwsza grupa może być stosowana jedynie w fazie opracowania, konturowania i produkcji pojazdów. Przy pomocy tych metod nie można poprawiać niezawodności produktu finalnego bez naruszenia jego konstrukcji (bez modernizacji). Druga grupa metod podwyższania odporności może być stosowana w trakcie eksploatacji nawet wówczas, gdy takich metod nie przewidywano w procesie opracowywania obiektu.

Autorzy pracy [19] jako cechy wpływające na odporność harmonogramów punktuja poniższe czynniki:

- czas buforowy,
- liczba pociągów w ramach rozkładu jazdy (im więcej, tym większe prawdopodobieństwo zakłóceń),
- liczba przystanków i stacji,
- przepływ pasażerów,
- najdłuższe odcinki jednotorowe.

Pierwszym z ocenianych parametrów rozkładu jazdy pod kątem odporności są punkty krytyczne. Według [1] jednym z podstawowych wyzwań jest ocena odporności rozkładu i wyznaczenie strategii mających na celu zmniejszenie wrażliwości na zakłócenia. Najpo-

pularniejszym sposobem jest analiza harmonogramu pod kątem przepustowości odstępów i eliminacja newralgicznych punktów. Istniejące miary odporności są przydatne przy porównywaniu różnych rozkładów jazdy w odniesieniu do ich odporności. Nie są jednak tak użyteczne, aby sugerowały bezpośrednio, w jakich punktach należy wprowadzić usprawnienia. W artykule autorzy proponują nowy wskaźnik uwzględniający pojęcie krytyczne. Określony jest on jako odwrotność sumy najkrótszych różnic odległości między pojazdami. Koncepcja ta pozwala znaleźć słabe punkty w harmonogramie. W celu ilościowej oceny, jak krytyczny jest punkt, określaną jest miarodajność w punktach krytycznych. Autorzy w artykule [28] prezentują jedną z metod poprawy jakości ruchu kolejowego. Jest to budowa niezawodnego harmonogramu, w którym pociągi będą w stanie zarówno zniwelować opóźnienia, jak i nie będą występować odchylenia od planowego czasu przyjazdu. Badania pokazują, że wskaźnik odporności w punkcie krytycznym można wykorzystać w celu zwiększenia stabilności rozkładu jazdy. W tym artykule przedstawiono zastosowanie metody optymalizacji (Robustness in Critical Points): ocena ex-post za pomocą symulacji mikroskopowej.

Kolejnym z parametrów wykorzystywanych do oceny rozkładu jazdy pod kątem odporności są rezerwy czasowe (bufor). Autorzy [14] za pomocą zależności  $WAD1$  (2) sprawdzają rozłożenie rezerw czasowych uwzględnionych w rozkładzie jazdy na analizowanej linii kolejowej. Równomierne rozłożenie rezerw ułatwia proces odzyskania punktualności po wystąpieniu zakłócenia na odcinku, a nie tylko w obrębie punktów stacyjnych.

$$WAD1 = \sum_{t=1}^N \frac{2t-1}{2N^2} \cdot s_t \quad (2)$$

gdzie:

$t$  – numer sekcji [-],

$s_t$  – rezerwa czasowa dla  $i$ -tej sekcji [s],

$N$  – liczba sekcji w rozpatrywanej relacji liniowej przejazdu [-].

$WAD$  jest liczbą względną od 0 do 1, gdzie  $WAD = 0,5$  oznacza, że ta sama kwota depozytu zabezpieczającego jest umieszczona w pierwszej połowie linii, tak jak w drugiej połowie, gdzie  $WAD$  mniejszy od 0,5 oznacza, że większy margines jest umieszczony w pierwszej połowie. Ci sami autorzy oceniają także rezerwy czasowe, wykorzystując średnią ważoną długość czasów buforowych. Bufor czasowy uwzględniony w harmonogramie jest niekorzystny dla podróżnych. Zwiększa on jednak odporność systemu na zakłócenia. W związku z tym wprowadzono współczynnik  $WAD2$  (3). Jest on średnią ważoną odległością czasów buforowych dodawanych do czasu przejazdu. Miara ma na celu wskazanie stopnia, w jakim bufor wpływa na dojazd pociągu do stacji końcowej i wyjazd z początkowej.



$$WAD2 = \frac{1 \sum_{i=0}^N i \cdot s_i}{N \sum_{i=0}^N s_i} \quad (3)$$

gdzie:

$s_i$  – czas buforowy,

$i$  – waga odcinka szlaku,

$n$  – liczba sekcji.

Parametr oceny związany z jakością podróży rozumianej jako rzeczywisty czas przejazdu został zdefiniowany przez autorów [18]. W podejściu integrującym trasę i wymianę pasażerską na stacji miara odporności jest definiowana jako *WTTE* (4).

$$WTTE = \frac{r_t - n_t}{n_t} \quad (4)$$

gdzie:

$r_t$  – czas rzeczywisty podróży pasażera [min],

$n_t$  – nominalny czas podróży [min].

W publikacji [19] przedstawiono metodę oceny odporności harmonogramów kolejowych, polegającą na sumowaniu liczby pociągów na szlaku jako miara odporności. Wraz ze zwiększeniem liczby pociągów poruszających się w ramach rozkładu jazdy, prawdopodobieństwo wystąpienia zakłócenia wzrasta. Mniejsza liczba pociągów oznacza większą odporność. Autorzy nie zróżnicowali jednak tego parametru w zależności od typu urządzeń sterowania ruchem na linii kolejowej.

Kolejnym ocenianym parametrem jest wpływ czynnika ludzkiego na odporność systemu eksploatacji transportu szynowego. Podejście autorów [16] związane jest z wpływem czasu lokowania podróźnych na stacji. Model systemu masowej obsługi uwzględnia zmienność intensywności zgłoszeń. Dopuszczono także możliwość zmienności strumienia obsługi. Natomiast autorzy [6] analizują wpływ czynnika ludzkiego pod kątem popełnienia błędów przez pracowników. Model służy do wyznaczania prawdopodobieństwa wystąpienia błędu ludzkiego podczas reorganizacji harmonogramu.

W publikacjach podejmujących zagadnienia transportu kolejowego nie wykazano podejść odpornościowych związanych z: czasem powrotu do stanu pierwotnego po wystąpieniu zakłócenia, czasem reakcji na zakłócenie, częstotliwością analizy systemu oraz oceną działań zależnych (ciągłości procesów). Przykładem działań zależnych w transporcie kolejowym są skomunikowania pociągów na stacjach oraz przesiadki drużyn pociągowych. W zależności od liczby przesiadek zaplanowanych w harmonogramie należy uwzględnić zależności systemowe (skalę przewozów, obciążenie szlaku). Problem odporności w odniesieniu do działań zależnych został zaznaczony tylko w jednej publikacji, związanej z procesami użytkowania [22], poprzez sumowanie ich liczby. Ze względu na specyfikę transportu szynowego, ściśle związaną z infrastrukturą, jest to podejście niewystarczające do oceny odporności systemu. Autorzy głównie koncentrują się na zakłóceniach czasowych, czyli sytuacjach, w których przejazd trwa dłużej niż oczekiwano bez podania przyczyny lub czas rozpoczęcia działania jest opóźniony.

## 4. Podsumowanie

Na podstawie przeglądu literatury wykazano, że odporność systemu transportu szynowego zależy od wielu zmiennych, w tym zdarzeń losowych. Często jednak jest ona kojarzona wprost z odpornością harmonogramu (rozkładem jazdy, planem pracy), co wynika z potrzeby zapewnienia punktualności ruchu i wywiązani się z warunków umowy transportowej przez przewoźnika i zarządcę sieci kolejowej.

W literaturze istnieją różne metody oceny odporności systemu transportu szynowego i harmonogramu, które uwzględniają m.in.: remonty i uszkodzenia infrastruktury, wypadki, warunki atmosferyczne, uszkodzenia taboru, punkty krytyczne w rozkładzie jazdy, rezerwy czasowe, czas przejazdu, liczbę pociągów na danym odcinku oraz czynniki ludzkie związane z czasem lokowania podróżnych na stacjach. Dowodzi to, że opracowanie harmonogramu odpornego na szereg wymienionych czynników niepożądanych nie jest zadaniem prostym.

## 5. Literatura

1. Andersson E.V., Peterson, A., Törnquist Krasemann J.: Quantifying railway timetable robustness in critical points. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 3, 2013, DOI: 10.1016/j.jrtpm.2013.12.002.
2. Bertsimas D., Sim M.: The Price of Robustness. *Operations Research*, Vol. 52, No. 1, 2004, DOI: 10.1287/opre.1030.0065.
3. Bešinovic N., Rob M.: An integrated micro-macro approach to robust railway timetabling. *Transportation Research*, Vol. 87, part B, 2016, DOI: 10.1016/j.trb.2016.02.004.
4. Briggs K., Beck C.: Modelling train delays with q-exponential functions. *Statistical Mechanics*, 378, 2007, DOI 10.1016/j.physa.2006.11.084.
5. Enzi M.: Der optimale Re-Investitionszeitpunkt für das Gleis unter dem Aspekt der Lebenszykluskosten. *ZEV Rail* 3/2012.
6. Evans A.W., Verlander N.Q.: Estimating the consequences of accidents: the case of automatic train protection in Britain. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 28, 1996, DOI: 10.1016/0001-4575(95)00057-7.
7. Federal Highway Administration: *Railroad-Highway Grade Crossing Handbook*, second ed. FHWA-TS-86-215. Springfield, Virginia: NTIS, 1986.
8. Goverde R.M.P., Hansen I.A.: Performance indicators for railway timetables. *Intelligent Rail Transportation Proceedings*, Beijing 2013.
9. Goverde R.: Railway timetable stability analysis using max-plus system theory. *Transportation Research*, 41, 2006, DOI: 10.1016/j.trb.2006.02.003.

10. Jacyna M., Golebiowski P.: An approach to optimizing the train timetable on a railway network. *WIT Transactions on The Built Environment*, 146, 2015, DOI: 10.2495/UT150571.
11. Jacyna M., Golebiowski P.: Traffic organization on the railway network and problem of construction of graphic train timetable. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, 22, DOI: 10.5604/12314005.1165399.
12. Jacyna M., Gołbiowski P., Krześniak M., Szkopiński J.: *Organizacja ruchu kolejowego*. PWN, Warszawa 2019.
13. Keisuke I., Norio T.: An algorithm to make a resilient timetable. *International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, France, 2017.
14. Kroon L.G., Dekker R., Vromans M.: *Cyclic railway timetabling: A stochastic optimization approach*. 4359, pp. 41–68, Springer-Verlag, Berlin 2007.
15. Kyriakidis M., Hirsch R., Majumdar A.: An analysis of accident precursors. *Safety Science*, 50, 2012.
16. Leszczyński J.: *Modelowanie symulacyjne w transporcie kolejowym*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1973.
17. Ling X., Peng Y., Sun S., Wang P.: Uncovering correlation between train delay and train exposure to bad weather. *Physica A* 512, 2018, DOI: 10.1016/j.physa.2018.07.057.
18. Lusby R., Larsen J., Bull S.: A survey on robustness in railway planning. *European Journal of Operational Research*, 26, 2018, DOI: 10.1016/j.ejor.2017.07.044.
19. Miguel A., Barber F., Ingolotti L.: *Robustness in Railway Transportation Scheduling*, 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, DOI: 10.1109/WCICA.2008.4594481.
20. Penicka M.: *Towards a Theory of Railways*. PhD Thesis, Czech Technical University and Technical University of Denmark, 2006.
21. Policella N., Smith S., Cesta S., Oddi A.: *Generating Robust Schedules through Temporal Flexibility*, ICAPS'04, Canada 2004.
22. Policella N.: *Scheduling with uncertainty: a proactive approach using partial order schedules*. PhD thesis, Università degli Studi di Roma, 2005.
23. Price C., Pragh D., Wilson M., Snooke N.: *The flame system: automating electrical failure mode and effects analysis*. Proc Reliab Maintain Symp 1995.
24. Restel F.J.: *Concept of railway transportation system resilience*. Safety and reliability of complex engineered systems, CRC Balkema, 2015.
25. Restel F.J.: *Model niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego*. PhD thesis, Wrocław University of Science and Technology, 2014.
26. Restel F.J.: *Train punctuality model for a selected part of railway transportation system*. Safety, reliability and risk analysis, CRC Balkema, 2014.
27. Schöbel A., Kratz A.: *A bicriteria approach for robust timetabling*, Springer, 2009, DOI: doi.org/10.1007/978-3-642-05465-5\_5.
28. Solinen E., Nicholson G., Peterson A.: *A microscopic evaluation of railway timetable robustness*. JofRTP&M 2017, DOI: 10.1016/j.jrtpm.2017.08.005.

29. Szkoda M., Lorenc A.K.: Analiza gotowości i niezawodności taboru kolejowego z uwzględnieniem rezerwy eksploatacyjnej. *Pojazdy Szynowe*, No. 3, 2014.
30. Takeuchi Y., Tomii N.: Robustness indices for train rescheduling. *International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Delft 2005.
31. Vaičiūnas G., Bureika G.: Approach modelling of constant interfailure process of renewal multi-unit fleet. *Eksplatacija i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 16 (3), 2014.
32. Warunki techniczne wykonania i odbioru podsypki tłuczniowej naturalnej i recyklingu stosowanej w nawierzchni kolejowej Id-110, Załącznik do uchwały Nr 1237/2016 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 13 grudnia 2016 r.
33. Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Szyn Kolejowych - Wymagania i badania Id-106, Załącznik do uchwały Nr 139/2019 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 5 marca 2019 r.
34. Wymagania architektoniczne dla kolejowych obiektów obsługi podróżnych, Załącznik do uchwały Nr 1083/2018 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 27 grudnia 2018 r.
35. Wymagania dla układów niezarowego źródła światła latarni sygnałowych sygnalizatorów kolejowych, Załącznik do uchwały Nr 1066 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 18 grudnia 2018 r.
36. Wymagania techniczne dla zapewnienia ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym, przed przepięciami i od wyładowań atmosferycznych w strefie oddziaływania sieci trakcyjnej DC 3 JV let-120, Załącznik do uchwały Nr 438/2018 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 12 czerwca 2018 r.
37. Wymagania w sprawie elementów wykonawczych Centralnego Systemu Dynamicznej Informacji Pasażerskiej i Infrastruktury towarzyszącej, Załącznik do uchwały Nr 1052/2018 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 18 grudnia 2018 r.
38. Wytyczne projektowania, budowy i odbioru sieci trakcyjnej, Załącznik do uchwały Nr 14/2010 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 10 maja 2010 r.