

Jerzy Węglerski

Instytut Transportu i Komunikacji

PROBLEMY NIEZAWODNOŚCI RUCHU POCIĄGÓW

Streszczenie. W pracy przedstawiono wzrastające znaczenie niezawodności pracy systemu sieci kolejowej oraz – na tle ogólnej teorii niezawodności – dokonano próby sformułowania modelu niezawodności ruchu pociągów, wskazując na powstające przy tym problemy.

1

Kolej wykonuje nałożone na nią lub przez nią przyjęte zadania przewozowe, uruchamiając pociągi w określonych relacjach, między stacjami początkowymi i końcowymi ich biegu. Pociągi pasażerskie muszą przy tym niemal zawsze przejść przez określone, obsługiwane przez nie, stacje pośrednie; pociągi towarowe mają częste za wyłączone zadanie przewożenia wagonów od stacji początkowej do końcowej, a wybór takiej lub innej drogi może być w takich przypadkach z punktu widzenia wykonania zadania obojętny. W praktyce występują jednak zwykle i tu pewne ograniczenia wyboru drogi, jeśli nie wynikające z potrzeby obsługi stacji pośrednich lub wymiany na nich grup wagonów, to związane np. z dopuszczalnym naciskiem osi na tor, nieelektryfikowaniem niektórych linii itp.

W ruchu pasażerskim, z uwagi na obsługę podróżujących, żąda się, by pociągi kursowały zgodnie z ogłoszonym rozkładem jazdy; szczególnie niedopuszczalne jest wyprawianie pociągów wczesniej, niż to przewiduje rozkład jazdy. W ruchu towarowym punktualność pociągów nie jest na ogół tak ściśle przestrzegana i jeszcze wciąż nie jest zbyt istotną dla klientów. Jeżeli jednak ruch pociągu odbywa się niezgodnie z rozkładem jazdy, wówczas powstaje określone prawdopodobieństwo, że ruch ten zostanie wielokrotnie zakłócony, a więc, że planowane czasy jazdy i postojów ulegną wydłużeniu. Jednocześnie zostaje naruszony prawidłowy przebieg obsługi pociągów lokomotywni oraz przebieg pracy drużyn pociągowych. Jeśli więc nie w interesie klientów, to w każdym razie w interesie kolei jest, aby ruch pociągów odbywał się zgodnie z rozkładem jazdy, zakładając, że jest on prawidłowo skonstruowany tj. że zapewnia ruch pociągów bez zakłóceń oraz prawidłową pracę lokomotyw i drużyn pociągowych.

System sieci kolejowej, na który składają się: tory, tabor, urządzenia sterowania i zabezpieczenia ruchu pociągów, operatorzy – pracownicy, a na

kolejach zelektryfikowanych - również sieć trakcyjna, jest jednak jak każdy system stworzony przez człowieka - systemem zawodnym. Nawet przy najlepiej pomyślanych zasadach organizacji ruchu pociągów i obsługi trakcyjnej, przy najprawidłowej skonstruowanym rozkładzie jazdy oraz przy możliwie najlepszej ich realizacji pozostają nadal nieuniknionymi zakłócenia płynnego ruchu pociągów, a więc wydłużenia czasu jazdy i postojów, a także nieprzewidziane postoje, spowodowane niesprawnościami elementów systemu sieci kolejowej. W wypadkach poważniejszych niesprawności może nawet zajść konieczność kierowania pociągów do stacji docelowych drogami okrężnymi.

Nie zawsze jednak przyjęte przez dany zarząd kolei zasady organizacji ruchu i obsługi trakcyjnej są podporządkowane zasadzie płynności ruchu jako zasadzie nadrzędnej. Skrajnym przykładem organizacji ruchu, niewłaściwej z punktu widzenia zapewnienia płynności ruchu, jest - stosowana przez niektóre zarządy kolei amerykańskich - organizacja ruchu pociągów towarowych oparta na zasadzie "leave when filled", tj. organizacja ruchu przewidująca wyprawianie pociągów towarowych ze stacji początkowych ich biegu w terminach uzależnionych od zebrania takiej liczby wagonów danej relacji, by pociąg posiadał przepisany ciężar (składy ładowne) lub długość (składy mieszane lub próżne). Być może, że w pewnych określonych warunkach taka właśnie organizacja ruchu może być z innych względów właściwa (np. gdy bardziej istotne jest zmniejszenie liczby pociągów niż uzyskanie płynności ich ruchu), ale musi ona mieć w swym założeniu dopuszczenie z góry wydłużonych czasów jazdy i postojów, gdyż z reguły nie mogą one być realizowane w swych minimalnych wartościach. Podobnie zresztą działa dopuszczane u nas wozesniejsze, niż przewiduje rozkład jazdy, wyprawianie pociągów towarowych. W dalszych rozważaniach pomija się w zasadzie zagadnienie tego rodzaju "legalnych" odchyień od terminów wyprawiania pociągów, przewidzianych w rozkładzie jazdy, oraz przypadki, gdy terminy te wogóle nie są ustalone.

2

Przedmiotem badań omawianych w dalszym ciągu są zagadnienia związane z zawodnością systemu sieci kolejowej. Ponieważ tego rodzaju temat nie był - jak się zdaje - podejmowany, więc przystępują do pierwszych badań trzeba wprowadzić pewne uproszczenia. Badania ogranicza się więc do pojedynczych linii kolejowych. Idąc jeszcze dalej i przyjmując, że pociągi przejeżdżające po tej linii należą do jednego zbioru, można zagadnienie sprowadzić do problemu niezawodności ruchu pociągu. Nie rezygnuje się przy tym z badania związku między niezawodnością ruchu jednego pociągu a ilością ruchu wszystkich pociągów na linii, a więc z dokonywanymi na tej linii przewozami.

Rozpatrując niezawodność ruchu jednego pociągu ze zbioru pociągów przejeżdżających po linii kolejowej, bada się niezawodność systemu zbudowane-

go z takich samych elementów, z jakich jest zbudowany system sieci kolejowej, a więc - z torów, sieci trakcyjnej, taboru, urządzeń sterowania i pracowników oraz operatorów.

Według terminologii przyjętej w Związku Radzieckim^{x)} pojęcie niezawodności (ros. надёжность) stanowi charakterystykę jakościową przedmiotu. Pod pojęciem niezawodności rozumie się więc "zdolność do zachowania jakości w określonych warunkach eksploatacji", a więc jest to niejako - według określenia B. Gniedenki i współautorów [1] - "jakość rozciągnięta w czasie". Przez "jakość" rozumie się przy tym zbiór własności określających stopień zdolności przedmiotu (elementu, systemu lub jego części) do zastosowania go zgodnie z przeznaczeniem. "Eksploatacja" - to zbiór wszystkich faz istnienia przedmiotu, a zatem zbiór obejmujących fazy: transportu, przechowywania, przygotowania do zastosowania zgodnie z przeznaczeniem, obsługi i remontu.

W GOST 13377-67 rozwinięte definicję B. Gniedenki, określając, że niezawodność jest to "zdolność (właściwość) wypełniania ustalonego zadania z utrzymaniem wartości parametrów technicznych w ustalonych przedziałach w ciągu żadanego okresu czasu lub w ciągu wykonywania żadanej pracy".

Dokładniej analizowane, pojęcie niezawodności jest według B. Gniedenki i współautorów zbiorem trzech pojęć:

- bezawaryjności (ros. безотказност'), tj. zdolności do utrzymywania sprawności w ciągu określonego przedziału czasu w określonych warunkach eksploatacji,
- trwałości (ros. долговечност') tj. zdolności do długotrwałej eksploatacji przy należytej obsłudze technicznej, obejmującej różne rodzaje napraw,
- zdolności naprawczej (ros. ремонтпригодност'), tj. przystosowania do zapobiegania, wykrywania i usuwania uszkodzeń.

System sieci kolejowej jest pod wielu względami systemem specyficznym; powstaje więc pytanie, czy tak rozumieć należy również pojęcie niezawodności tego systemu lub odnoszące się do węższego systemu pojęcie niezawodności ruchu pociągu. Napewno chodzi tu również o zdolność do zachowania jakości w określonych warunkach eksploatacji, przy czym jednak szczególnie istotną jest tu tylko bezawaryjność i zdolność naprawcza. Każdy natomiast system sieci kolejowej jest z samej swej natury trwałym, często nawet nadmiernie trwałym, dzięki ciągłej wymianie i naprawom jego niezliczonych poszczególnych elementów. Jeżeli ponadto rozpatruje się jedynie niezawodność ruchu pociągu, uruchamianego na stosunkowo krótki okres, to trwałość w rozumieniu B. Gniedenki i współautorów przestaje być istotną cechą.

Autorzy zachodni przez pojęcie niezawodności (ang. reliability, franc. la fiabilité, niem. die Zuverlässigkeit) rozumieją charakterystykę ilości-

^{x)} GOST 13377-67, grupa TOO: "Należność" w technice. "Terminy".

ciową, a w szczególności "prawdopodobieństwo, że urządzenie będzie wypełniać swoje zadania zgodnie z żądaniami w ciągu ustalonego przedziału czasu" [3]. Według innej definicji [4], jest to "prawdopodobieństwo, że system zachowa zdolność do pracy co najmniej w ciągu ustalonego przedziału czasu przy używaniu go w określonych warunkach". W jednej z polskich prac [5] niezawodność określa się jako "stopień zaufania, że urządzenie spełni postawione zadanie". Autorzy radzieccy określają tak rozumianą niezawodność pojęciem "prawdopodobieństwa sprawnej pracy" (ros. wierojatnost' bezotkaznoj raboty). Miarą niezawodności jest więc wartość funkcji niezawodności

$$R(t) = P(\tau > t);$$

jest to prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy w okresie czasu $0 \dots t$.

R. Barlow i F. Proschan definiują matematycznie nieco inaczej to prawdopodobieństwo, a mianowicie:

$$R(t) = E_g[X(t)],$$

gdzie $X(u)$ jest wektorem opisującym stan systemu w momencie u , przy czym $X(u) = 1$, gdy w powyższym momencie urządzenie pracuje prawidłowo oraz $X(u) = 0$ w przeciwnym przypadku, zaś $g(x)$ jest funkcją liczbową przybierającą wartości $g(1) = 1$ i $g(0) = 0$. Wartość oczekiwana funkcji $g(x)$, oznaczona $E_g(x)$, jest prawdopodobieństwem, że urządzenie funkcjonuje prawidłowo w okresie czasu $0 \dots t$.

Jeśli przyjąć interpretację pojęcia niezawodności według autorów zaohodnich i określić funkcję niezawodności ruchu pociągów, to byłoby to prawdopodobieństwo, że pociąg (wyprawiony punktualnie) ze stacji początkowej swego biegu, znajdzie się po upływie czasu t w przewidzianym planem - rozkładem jazdy - miejscu. Przez czas niezawodnej "pracy pociągu" rozumie się przy tym zarówno czas, w ciągu którego porusza się on zgodnie z planem, jak również czas planowych postojów.

I tu znów przejawia się specyfika systemów sieci kolejowej. Jazdę pociągu ze zmniejszoną w stosunku do planu prędkością należałoby uważać za przejaw niesprawności pociągu; czas jej trwania narasta jednak w czasie w sposób ciągły - gdzie więc go umiejscowić na osi czasu pracy pociągu? Powstające wskutek tego lub z innych przyczyn niewielkie opóźnienie może pociąg na następnym odcinku drogi wyrównać; opóźnienia takiego można wówczas nie uważać za niesprawność. Wydaje się, że sprawę rozwiązałoby w tym przypadku ustalenie dopuszczalnych czasów trwania niesprawności oraz pewna rezygnacja ze zbyt ścisłego umiejscowiania go w czasie.

Jednocześnie trzeba stwierdzić, że niesprawność pociągu może pojawić się już w chwili jego uruchamiania, a nawet we wcześniejszym momencie - w fazie przygotowywania pociągu do odjazdu. W każdym z tych przypadków następuje opóźnione uruchomienie pociągu. Funkcja niezawodności posiada za-

tem wartość mniejszą od jedności już dla $t = 0$. Fakt ten należy uwzględnić, definiując funkcję niezawodności ruchu pociągów.

Pojęcie niezawodności początkowej tj. prawdopodobieństwa, że w chwili $t = 0$ element będzie pracował poprawnie, wprowadzają m.in. E. Fidelis i współautorzy [5]. Zwracają oni uwagę, że niezawodność początkowa oznacza praktycznie prawdopodobieństwo wylosowania ze zbioru jednakowych - a priori - elementów (w naszym przypadku np. lokomotyw) takiego elementu, który w chwili $t = 0$ będzie funkcjonował poprawnie.

Pociąg doznający zakłóceń wskutek niesprawności elementów - toru, sieci trakcyjnej, taboru, urządzeń sterowania i zrk lub operatorów - dojeżdża z reguły, choć z opóźnieniem, do swego oelu z wyjątkiem bardzo nielicznych wypadków poważnych katastrof. Ma się tu zatem do czynienia z procesem odnowy o skończonym czasie trwania odnowy.

.B. Gniedenko i współautorzy wprowadzają jako podstawową charakterystykę niezawodności w przypadkach procesów odnowy o skończonym czasie odnowy - wskaźnik gotowości (ros. koeficient gotownosti) $k_g(t)$, równy prawdopodobieństwu tego, że w chwili t system znajduje się w stanie sprawności. Jest to zarazem w granicy, jak można wykazać, średni udział czasu, w ciągu którego system przebywa w stanie sprawności

$$k_g = \lim_{t \rightarrow \infty} k_g(t) = \frac{T_1}{T_1 + T_2},$$

gdzie

T_1 - oczekiwany czas pracy systemu od chwili jej rozpoczęcia (ostatniej odnowy) do chwili najbliższego uszkodzenia,

T_2 - oczekiwany czas odnowy systemu od chwili uszkodzenia do chwili odnowy.

Jeżeli zatem planowy czas pracy pociągu, niezbędny dla odbycia przez pociąg drogi od stacji początkowej do stacji końcowej jego biegu wynosi T , to oczekiwane opóźnienie można określić wzorem

$$T \frac{T_2}{T_1}.$$

Ponieważ

$$k_g = \frac{1}{1 + T_2/T_1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - k_g}{k_g}$$

zatem oczekiwane opóźnienie możnaby wyrazić wzorem

$$T \frac{1 - k_g}{k_g}.$$

Wzór tak sformułowany nie uwzględniałby jednak wspomnianej możliwości zaistnienia niesprawności w okresie przygotowywania pociągu do odjazdu na stacji jego formowania.

Pierwszym zadaniem, które trzeba dokonać, jest sformułowanie charakterystyk niezawodnościowych ruchu pociągu, traktując go jako proces odnowy o skończonym czasie odnowy; w ślad za tym należy sformułować i sprawdzić hipotezy o rozkładach długości życia i długości czasu odnowy systemu, a także określić wartości miar położenia i miar zmienności tych zmiennych losowych. Oczywiście najwygodniej by było, gdyby rozkłady te można było uznać za wykładnicze.

3

Niezależnie od sformułowania pierwszych pytań, na jakie należy odpowiedzieć przystępując do badań nad niezawodnością ruchu pociągów, trzeba wyjaśnić, jakie praktyczne korzyści mogą przynieść te badania.

Zwykle zadanie teorii niezawodności – poszukiwanie racjonalnych dróg zwiększania niezawodności systemu, w tym przypadku niezawodności ruchu pociągów, jest oczywiście i tu aktualne. Jakże może przynieść efekty zwiększenie niezawodności ruchu pociągów? Daje ono nie tylko zmniejszenie zakłóceń bezpośrednio spowodowanych niesprawnościami, a więc zwiększenie szybkości handlowej i zdolności przewozowej linii, ale również zmniejszenie zakłóceń przenoszonych się na inne pociągi i powodujących wtórne zakłócenia ich ruchu. Jeżeli dla ruchu pociągów na liniach magistralnych postawić jako warunek żądanie by zakłócenia ruchu jednych pociągów nie przenosiły się na pociągi jadące za nimi z tą samą szybkością (na określonym poziomie ufności), to zwiększenie niezawodności ruchu pociągów pozwala zmniejszyć średni odstęp między pociągami, zwiększyć ich liczbę i zdolność przewozową linii.

Zasadniczy schemat niezawodnościowy systemu, który został określony jako "ruch pociągu", można przyjąć jako nader prosty; jest to pięć elementów w układzie szeregowym: tor, sieć trakcyjna, tabor, urządzenia sterowania i zrk, operatorzy. Zwiększenie niezawodności systemu można osiągać przez zwiększanie niezawodności poszczególnych elementów, ale również w niektórych przynajmniej przypadkach – przez rezerwowanie. Rezerwowanie elementu "tor" uzyskuje się np. przez tzw. banalizację linii dwutorowej, przez budowę trzeciego toru na linii dwutorowej itp. Rezerwowanie automatycznych urządzeń sterowania ruchem osiąga się dając możliwość stosowania sterowania przez człowieka. Istnieje jednak również możliwość zwiększenia niezawodności systemu drogą zastępowania zawodnych operatorów – maszyni-

stw, dyżurnych ruchu - przez wysoce niezawodne automatyczne systemy sterowania. Jak jednak słusznie zauważa B. Gniedenko i współautorzy, "powiększenie niezawodności nie przychodzi darmo, lecz wymaga określonych nakładów materialnych, jak również systematycznych badań naukowych". Badania te powinny mieć w pierwszym rzędzie na celu - jak wspomniano - poszukiwanie racjonalnych dróg zwiększania niezawodności. Zwiększanie niezawodności jest jednak racjonalne tylko do pewnych granic, które określa porównanie nakładów na zwiększanie niezawodności z osiąganymi dzięki zwiększaniu niezawodności systemu efektami. W ten sposób wracamy do punktu wyjściowego rozważań.

W warunkach kapitalistycznych żądana niezawodność wynika z umowy albo też musi być zapewniona z uwagi na konkurencję, z drugiej strony, ponieważ wraz z podwyższaniem poziomu niezawodności wzrasta koszt produkcji, poziom ten jest określony ceną jaką gotów zapłacić odbiorca, a czasem ograniczony terminem dostawy. Musi więc nastąpić kompromis między niezawodnością, terminem dostawy i kosztem produkcji; stąd ważna bardzo optymalizacja dróg osiągnięcia niezawodności [4].

Już samo stwierdzenie obecnego poziomu niezawodności ruchu pociągów wymaga nader znacznych badań statystycznych, które trzeba poprzedzić opracowaniem metody ich prowadzenia. Szczególne trudności wywołuje odróżnienie zakłóceń spowodowanych bezpośrednio niesprawnościami systemu od innych zakłóceń - wtórnych, spowodowanych kolizjami.

Zwiększenie niezawodności poszczególnych elementów systemu wymaga sięgnięcia analizą do przyczyn niesprawności, a więc wymaga szczegółowej analizy każdej niesprawności. W tym celu w przypadkach podobnych badań innych systemów organizuje się specjalne służby niezawodności, do których woliąga się pracowników eksploatacji - dla dokonywania obserwacji oraz pracowników nauki - dla określania metodyki badań i metodyki opracowywania ich wyników. Jak efektywnie zorganizować tego rodzaju służbę niezawodności dla potrzeb kolei jest odrębnym zagadnieniem. Zadaniem służby byłoby zarazem badanie efektów przedsięwzięć zmierzających do zwiększenia niezawodności.

Jednak nawet nie zmieniając poziomu niezawodności systemu można poszukiwać dróg zmniejszenia wpływu pojawiających się niesprawności systemu na ruch pociągów w złożonym systemie sieci kolejowej.

4

Dotychczas w dziedzinie kolejnictwa zajmowano się wyłącznie zagadnieniami niezawodności podrzędnych elementów taboru lub urządzeń zabezpieczenia ruchu kolejowego. Prace w tym kierunku prowadzi się w Polsce m.in. na Politechnice Krakowskiej (tabor) i na Politechnice Warszawskiej (urządzenia zrk) oraz w COBIRMK. Dopiero w ostatnim czasie podjęto prace nad badaniem niezawodności lokomotyw jako systemów - w ZSRR, gdzie specjali-

zuje się w tej dziedzinie Omski Instytut Inżynierów Transportu Kolejowego [6], oraz w NRD [7].

Wreszcie w Polsce ukazały się ostatnio publikacje, w których próbuje się sformułować nie tylko modele niezawodnościowe niektórych podsystemów sieci kolejowej (np. nawierzchnia kolejowa [8]), ale nawet całego kolejowego systemu transportowego [9]. Praca niniejsza stanowi zapoczątkowanie innego ujmowania tego zagadnienia, niż tego dokonali L. Nowosielski i R. Olejniczak w ostatniej z wymienionych prac.

LITERATURA

1. B. Gniedenko, J. Bielajew, A. Sołowiew: Metody matematyczne w teorii niezawodności, Warszawa 1968, Tłum. z ros.
2. B. Peyret: La fiabilité industrielle, Ses bases mathématiques, Paris 1969.
3. R. Barlow, F. Proschan: Mathematical theory of reliability, New York 1964.
4. Reliability handbook, New York 1966.
5. Fidelis i inni: Matematyczne podstawy oceny niezawodności, Warszawa 1966.
6. J. Pawłowicz, A. Riabkow, A. Sierlegin, W. Czetwierzgow: Надёжность локомотивов. Теоретические вопросы. Омск 1970.
7. R. Oettel: Struktur- und Funktionsmodelle von Triebfahrzeugen. "Schienen-Fahrzeuge", 1972, nr 5.
8. T. Basiewicz, H. Bażuch: Niezawodność nawierzchni kolejowej. "Problemy kolejnictwa" 1971, z. 51.
9. L. Nowosielski, R. Olejniczak: Niezawodność jako jeden z elementów oceny prawidłowości pracy kolejowego systemu transportowego. "Problemy Kolejnictwa" 1971, z. 51.

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Р е з ю м е

В статье представлено всё возрастающее значение надёжности работы системы железнодорожной сети и на основе общей теории надёжности сделана попытка формулировки модели надёжности движения поездов, указывая на возникающие при этом проблемы.

TRAINS- TRAFFIC RELIABILITY PROBLEMS

S u m m a r y

In the paper the growing meaning of railway-network-systems reliability has been discussed. Formulating the model of trains-traffic reliability the author shows the most important problems concerning this subject.