



Wprowadzenie do inżynierii ruchu kolejowego

Krzysztof Chwesiuk

Szczecin, 2010



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Prof. dr hab. inż. Krzysztof Chwesiuk

Akademia Morska w Szczecinie

Wydział Inżynieryjno-Ekonomiczny Transportu

WPROWADZENIE DO INŻYNIERII RUCHU KOLEJOWEGO

1. WSTĘP

Inżynieria ruchu kolejowego jest dziedziną naukową i działalności praktycznej, która wykorzystuje metody matematyczne, techniczne i ekonomiczne do rozwiązywania problemów przepustowości sieci kolejowej oraz regulacji ruchu kolejowego.

Już u zarania powstania transportu kolejowego, połowa XIX wieku, pojawiły się problemy zapewnienia bezpieczeństwa ruchu pociągów i wykonywania manewrów. Stąd pojawiła się potrzeba wydzielenia pierwszego obszaru inżynierii ruchu kolejowego, a mianowicie sterowania ruchem kolejowym wraz z techniką ruchu kolejowego. Współcześnie pod pojęciem sterowania ruchem kolejowym rozumie się dział techniki kolejowej, który zajmuje się urządzeniami służącymi do sprawnego i bezpiecznego prowadzenia ruchu pociągów i wykonywania manewrów. Przez te urządzenia rozumiane są środki techniczne, za pomocą których jest możliwe sprawne i bezpieczne poruszanie się pojazdów kolejowych po torach kolejowych i rozjazdach.

Kolejnym w rozwoju historycznym zagadnieniem inżynierii ruchu kolejowego było w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego wieku opracowanie równania ruchu pociągu, czyli matematycznej zależności dynamiki ruchu pojazdu trakcyjnego (pociągu, pojazdu trakcyjnego lub wagonu lub grupy wagonów) po zadanym torze kolejowym pod względem przekroju poprzecznego i podłużnego. Korzystając z równania ruchu pociągu można obliczyć największą dopuszczalną masę składu pociągu, prędkość i czas jego jazdy oraz czas hamowania, a więc najistotniejsze parametry dotyczące kinematyki ruchu pociągu po zadanym torze kolejowym.

Kolejnym osiągnięciem w rozwoju inżynierii ruchu kolejowego były prace prowadzone w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku w Polsce, a dotyczące zagadnień modelowania ruchu pociągów na sieci kolejowej w celu między innymi wypracowywania racjonalnych decyzji regulacyjnych tego ruchu. Wykorzystując modele matematyczne ruchu jednostek przemieszczania (pociągów i grup wagonów) oraz ograniczenia techniczno-technologiczne i

ekonomiczne funkcje kryterium można było wypracowywać racjonalne decyzje dotyczące regulacji ruchu pociągów na sieci kolejowej w hierarchicznym systemie podejmowania decyzji.

2. TECHNIKA RUCHU KOLEJOWEGO I STEROWANIE RUCHEM KOLEJOWYM

U zarania powstania transportu kolejowego, kiedy na odcinku linii kolejowej pojawił się więcej niż jeden pojazd kolejowy, powstał podstawowy problem zapewnienia bezpieczeństwa ruchu tych pojazdów, a w szczególności nie dopuszczenia do sytuacji zderzenia się tych pojazdów. Wymagała ta sytuacja z punktu widzenia ówczesnego ruchu kolejowego opracowania powszechnie stosowanych zasad ruchu kolejowego. Były to na wskroś działania praktyczne techniki ruchu kolejowego, która była prekursorem inżynierii ruchu kolejowego i do dnia dzisiejszego stanowi jej element składowy.

Do podstawowych zasad techniki ruchu kolejowego należy zaliczyć:

- 1) prawostronny ruch pociągów na większości linii kolejowych dwu- i więcej torowych,
- 2) na najmniejszych elementach linii kolejowej (szlaku i/lub odstępie kolejowym) jednocześnie może znajdować się tylko jeden pociąg,
- 3) ustalenie administracyjnie kategorii pociągów, a tym samym kolejności ich wyprawiania na szlak,
- 4) podstawowym planem ruchu pociągów na odcinku linii kolejowej jest rozkład jazdy.

Aby zapewnić realizację kardynalną zasadę techniki ruchu kolejowego, a mianowicie, że na najmniejszych elementach linii kolejowej (szlaku i/lub odstępie kolejowym) jednocześnie może znajdować się tylko jeden pociąg stosuje się zasadę wyprawiania pociągów na szlak i/lub odcinek linii kolejowej według odstępu odległości. W praktyce potwierdzeniem, że na najmniejszych elementach linii kolejowej (szlaku i/lub odstępie kolejowym) jednocześnie może znajdować się tylko jeden pociąg było pierwotnie zastosowanie człowieka, który występował w roli „pilota” przemierzając szlak i/lub odstęp kolejowy w pociągu. Dopóki „pilot” fizycznie nie dojechał do stacji kolejowej ograniczającej szlak kolejowy i/lub do posterunku odstępowego ograniczającego odstęp kolejowy nie można wyprawić kolejnego pociągu.

Kolejnym usprawnieniem w zakresie realizacji kardynalnej zasady techniki ruchu kolejowego było zastąpienie człowieka – „pilota” metalową blaszką zwaną „berłem”. Przy czym zasady prowadzenia były identyczne jak w przypadku „pilota”.

W ramach mechanizacji i automatyzacji, a następnie informatyzacji procesów produkcyjnych również stworzono całą gamę urządzeń sterowania ruchem kolejowym. **Sterowanie ruchem kolejowym** jest to dział techniki kolejowej, a dokładniej inżynierii ruchu kolejowego, który zajmuje się urządzeniami służącymi do sprawnego i bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego. Przez urządzenia te rozumiane są środki techniczne, za pomocą których jest możliwe sprawne i bezpieczne poruszanie się pojazdów kolejowych po torach i rozjazdach.¹

Ruch pociągów i pojazdów manewrowych odbywa się po torach i rozjazdach według określonych przebiegów. Przez pojęcie **przebieg** jest rozumiany zespół warunków koniecznych do wykonania określonego ruchu pojazdu kolejowego po danym układzie torów. W skład przebiegu wchodzi droga przebiegu, droga ochronna i urządzenia ochronne.

Urządzenia sterowania ruchem kolejowym składają się z poszczególnych podzespołów, które realizują określone funkcje. Można wyodrębnić następujące podzespoły składowe urządzeń sterowania ruchem kolejowym:

- 1) urządzenia nastawcze, których zadaniem jest nastawianie zwrotnic na drodze przebiegu oraz nastawianie sygnałów na sygnalizatorach;
- 2) urządzenia sygnalizacyjne, których zadaniem jest przekazywanie sygnałów związanych z prowadzeniem ruchu pociągów lub manewrów od personelu kierującego ruchem do personelu kierującego pojazdami trakcyjnymi i personelu wykonującego manewry;
- 3) urządzenia zamykające, zależnościowe i kontrolne, których zadaniem jest zamykanie urządzeń wchodzących w skład drogi przebiegu w odpowiednim położeniu oraz realizowanie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami przebiegu i poszczególnymi przebiegami w celu bezpiecznego i sprawnego prowadzenia ruchu kolejowego. Ponadto urządzenia te spełniają rolę kontroli stanu poszczególnych elementów będących składowymi urządzeń nastawczych i sygnalizacyjnych;
- 4) urządzenia zasilające, których zadaniem jest zasilanie w prąd elektryczny poszczególnych podzespołów urządzeń sterowania ruchem kolejowym;
- 5) urządzenia połączeniowe w postaci połączeń mechanicznych, pędni elastycznej lub kabli, których zadaniem jest połączenie poszczególnych podzespołów urządzeń sterowania ruchem kolejowym w jedną całość.²

Z punktu widzenia lokalizacji poszczególne podzespoły urządzeń sterowania ruchem kolejowym dzieli się na następujące zespoły:

¹ Zob. K. Chwesiuk, P. Zalewski; *Technologia transportu kolejowego*; WkiŁ Warszawa, 1987, s.75

² Tamże, s. 76 - 77

- 1) zespoły urządzeń zewnętrznych, które znajdują się w terenie przy zwrotnicach, wykojeńnicach itp. urządzeniach;
- 2) zespoły urządzeń wewnętrznych, zlokalizowanych w budynku nastawni, w skład których wchodzi: część urządzeń nastawczych, urządzenia zależnościowe i kontrolne, urządzenia zasilające.³

Wśród dużej różnorodności typów i konstrukcji urządzeń sterowania ruchem kolejowym ze względu na miejsce stosowania tych urządzeń można wyodrębnić dwa rodzaje tych urządzeń:

- 1) urządzenia stacyjne,
- 2) urządzenia liniowe.⁴

Ad 1) Spośród urządzeń stacyjnych sterowania ruchem kolejowym można wyodrębnić następujące typy urządzeń:

- 1) urządzenia mechaniczne:
 - a) kluczowe (ręczne),
 - b) scentralizowane;
- 2) urządzenia elektryczne:
 - a) elektromechaniczne,
 - b) przekaźnikowe,
 - c) komputerowe,
 - d) na górkach rozrządowych.

Ad 2) Natomiast wśród urządzeń liniowych sterowania ruchem kolejowym można wyodrębnić następujące typy urządzeń:

- 1) blokada liniowa:
 - a) półsamoczynna,
 - b) samoczynna;
- 2) urządzenia samoczynnego hamowania pociągów i sygnalizacji kabinowej;
- 3) urządzenia automatycznej sygnalizacji na przejazdach kolejowych;
- 4) urządzenia zdalnego sterowania ruchem kolejowym na odcinku linii kolejowej;
- 5) urządzenia automatycznego sterowania ruchem kolejowym na linii kolejowej.

Zarówno w zakresie sterowania ruchem kolejowym, jak i regulacji tego ruchu stosuje się sygnalizację kolejową. **Sygnalizacja kolejowa** jest to system porozumiewania się pracowników kolejowych pomiędzy sobą w zakresie ruchu pociągów oraz wykonywania manewrów. Do

³ Tamże, s. 77

⁴ Tamże, s. 77

porozumiewania tego używa się przewidzianych odpowiednimi przepisami kolejowymi sygnałów optycznych lub słuchowych. Sygnały optyczne lub akustyczne są to znaki umowne odbierane wzrokiem lub słuchem, którym nadano odpowiednie znaczenie. Każdemu sygnałowi przyporządkowane są umowne znaki wyrażane na przykład za pomocą dźwięków, barw, liczby i układu świateł lub też za pomocą przedmiotów o odpowiednim kształcie i barwie. Do przekazywania sygnałów kolejowych używa się urządzeń sygnalizacyjnych, przyrządów sygnalizacyjnych oraz wskaźników. Do urządzeń sygnalizacyjnych zalicza się w zasadzie wszystkie urządzenia stałe, zwane sygnalizatorami torowymi, które mogą być kształtowe lub świetlne.⁵

3. RÓWNANIE RUCHU POCIĄGU

Kolejnym obszarem zainteresowań inżynierii ruchu kolejowego jest poznanie zjawisk zachodzących podczas ruchu pojazdów kolejowych po torze kolejowym. W tym rozumieniu pojazdem będzie pociąg, pojazd trakcyjny, pojedynczy wagon lub grupa wagonów.

Na pojazd kolejowy podczas jego ruchu po torze kolejowym działają następujące siły:

- 1) zgodne z kierunkiem ruchu pojazdu:
 - a) siła pociągowa wytwarzana w pojeździe trakcyjnym,
 - b) siła ciężkości na spadku toru;
- 2) przeciw kierunkowi jazdy pojazdu – opory ruchu, do których zliczamy:
 - a) opory jazdy jako opory zasadnicze, czyli stałe opory jazdy powodowane oporami pracy silników i mechanizmów trakcyjnych, opory styku kół z torem kolejowym, opory powietrza oraz opory tarcia czopów w łożyskach osiowych,
 - b) opory dodatkowe, które występują tylko okresowo, do nich zalicza się: opory wzniesienia toru, opory łuku toru oraz opory przyspieszenia.

Po zapisaniu wszystkich zależności pomiędzy siłami działającymi na pojazd kolejowy podczas ruchu po torze kolejowym oraz uwzględnieniu przeliczeń jednostek uzyskuje się następujące równanie:

$$\frac{dV}{dt} = 120 \times p \text{ [km/h}^2\text{]}$$

⁵ Tamże, s. 78

dt

gdzie:

dV – przyrost prędkości jazdy pojazdu po torze kolejowym,

dt – przyrost czasu jazdy pojazdu po torze kolejowym,

p – przyspieszenie (opóźnienie) ruchu pojazdu po torze kolejowym w $[daN/t]$.⁶

Przedstawiona zależność jest poszukiwanym równaniem ruchu pociągu, które można wyrazić w następujący sposób: jeśli na pociąg działa jednostkowa siła przyspieszająca (lub opóźniająca) $p = 1 daN/t$, to pociąg uzyskuje przyspieszenie (lub opóźnienie) wynoszące 120

km/h^2 , czyli w okresie jednej godziny osiągnie przyrost (lub zmniejszenie) prędkości jazdy o 120 km/h ; oczywiście jednostkowa siła przyspieszająca (opóźniająca) $p [daN/t]$ wywołuje w okresie jednej godziny przyrost (lub zmniejszenie) prędkości jazdy pociągu o $120 \times p [km/h]$.⁷

Korzystając z przedstawionego równania ruchu pociągu można obliczyć prędkość i czas jazdy na danym odcinku toru, prędkość i czas hamowania pociągu na danym odcinku toru oraz największą dopuszczalną masę brutto składu pociągu. Są to najważniejsze parametry opisujące ruch pojazdów kolejowych po danym odcinku toru kolejowego.

Najczęściej pojazd kolejowy porusza się po torze kolejowym ruchem jednostajnie przyspieszonym lub jednostajnie opóźnionym. Chcąc więc wykorzystać równanie ruchu pociągu dla ustalenia zależności:

$$V = f(t); V = f(S) \text{ oraz } t = f(S)$$

gdzie:

V – prędkość jazdy pociągu,

t – czas jazdy pociągu,

S – droga przejechana przez pociąg.

należy równanie ruchu pociągu całkować metodą analityczną lub graficzną.

⁶ Zob. W. Wyrzykowski; *Ruch kolejowy Tom I*; WKiŁ, Warszawa, 1965, s. 139

⁷ Tamże, s. 140

W celu określenia zależności $V = f(t)$, z której określa się prędkość jazdy pociągu w dowolnym czasie t , korzysta się z równania ruchu pociągu w następującej postaci:

$$dt = \frac{dV}{120 \times p},$$

które całkuje się w granicach czasu t_1 i t_2 oraz w granicach prędkości V_1 i V_2 odpowiadającym tym czasom, otrzymując:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{1}{120} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{p}$$

czyli

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{120} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{p}$$

przy czym, jest wiadomo, że $p = f(V)$.

W celu otrzymania zależności $V = f(S)$, umożliwiającej określenie prędkości jazdy pociągu w dowolnym miejscu drogi S wychodzi się z następującej zależności:

$$V dt = \frac{V \times dV}{120 \times p}$$

czyli

$$dS = \frac{V \times dV}{120 \times p}$$

Całkując powyższe równanie różniczkowe w granicach drogi S_1 i S_2 oraz w granicach prędkości V_1 i V_2 odpowiadającym tym miejscom otrzyma się następujące równanie:

$$S_2 - S_1 = \int_{V_1}^{V_2} \frac{V \times dV}{120 \times p}$$

przy czym $p = f(V)$.

Chcąc ustalić zależność $t = f(S)$, pozwalającą na określenie czasu jazdy pociągu na torze o długości S korzystamy z następującej zależności:

$$V = \frac{ds.}{dt} = f(t),$$

skąd:

$$ds. = f(t) \times dt$$

Po scałkowaniu powyższego równania w granicach drogi S_1 i S_2 oraz w granicach czasu t_1 i t_2 odpowiadającym tym miejscom otrzyma się następujące wyrażenie:

$$t_2$$

$$S_2 - S_1 = \int_{t_1} f(t) dt^8$$

4. Regulacja ruchu kolejowego

Kolejnym obszarem inżynierii ruchu kolejowego zarówno w ujęciu praktycznym, jak i teoretycznym jest regulacja ruchu kolejowego.

Podstawowym planem ruchu kolejowego w ujęciu sieci kolejowej jest rozkład jazdy pociągów, który najczęściej wykonuje się metodami graficznymi w postaci wykresów ruchu pociągów z wykorzystaniem metod równania ruchu pociągu. Rozkład jazdy pociągów opracowuje się dla powtarzalnych okresów czasu – dób. Przy czym powtarzalność ta odnosi się do dni roboczych oddzielnie i dni weekendowych oddzielnie.

Rozkład jazdy pociągów w ujęciu sieci kolejowej jako plan ruchu pociągów na tej sieci stanowi zadanie optymalizacyjne wielokryterialne. Jako kryteria optymalizacji przyjmuje się kryteria ilościowe i jakościowe. Zatem przyjmując, że rozkład jazdy pociągów w ujęciu sieci kolejowej stanowi rozwiązanie optymalne dla przyjętego zbioru kryteriów to w warunkach normalnych powinien być on realizowany. Praktyka działalności transportu kolejowego niesie różnego rodzaju zakłócenia w realizacji rozkładu jazdy pociągów powodując zaistnienie sytuacji ruchowych odbiegających od przyjętego planu ruchu pociągów – rozkładu jazdy pociągów. Występowanie takich zakłóceń w realizacji rozkładu jazdy pociągów wymusza potrzebę działań regulacyjnych, które zmierzają do najkrótszego w czasie przywrócenia sytuacji ruchowej ujętej w rozkładzie jazdy, czyli powrotowi do rozwiązań optymalnych w zakresie ruchu kolejowego.

Działalność regulacji ruchu kolejowego w wielu zarządach na świecie realizowana jest poprzez hierarchiczny system dyspozytorski w zakresie dyspozytury ruchu pociągów. Hierarchiczny system regulacji ruchu pociągów w Polsce posiada następujące szczeble regulacji:

- szczebel centralny sieci kolejowej – główna dyspozytura,
- szczebel odcinka linii kolejowej – dyspozytura odcinkowa,
- szczebel posterunku ruchu – dyżurny ruchu dysponujący,

⁸ Tamże, s. 141 - 142

- szczebel obsługi pociągu – drużyna lokomotywowa.

Każdy szczebel hierarchii regulacji ruchu kolejowego wypełnia w swoim działaniu cztery funkcje, a mianowicie:

- 1) regulacyjną,
- 2) kontrolną,
- 3) ewidencyjną,
- 4) planistyczną.

Ad 1) Funkcja regulacyjna jest funkcją podstawową, polega na przesyłaniu sterowań do niższych szczebli regulacji ruchu kolejowego w celu uzyskania zamierzonej regulacji ruchu pociągów.

Ad 2) Funkcja kontrolna polega na odbieraniu z niższych szczebli hierarchii regulacji ruchu kolejowego informacji o realizacji ruchu, więc pod względem kierunku przepływu informacji jest to sprzężenie zwrotne w stosunku do regulacji ruchu kolejowego.

Ad 3) funkcja ewidencyjna polega na składowaniu i porządkowaniu informacji o zrealizowanym ruchu pociągów dla potrzeb innych funkcji zarządzania.

Ad 4) Funkcja planistyczna polega na prognozowaniu ruchu pociągów w celu przygotowania odpowiednich decyzji regulacyjnych. Jest to w pewnym stopniu przedłużenie funkcji kontrolnej.

Im wyższy jest szczebel hierarchii regulacji ruchu kolejowego, tym większe znaczenie mają funkcje ewidencyjne i planistyczne, bowiem zwiększa się zakres przestrzenny i czasowy regulowanego ruchu pociągów, natomiast maleje możliwość i celowość bezpośredniego ingerowania w drobne operacje ruchowe. Z tego samego względu najniższe szczeble hierarchii – obsługa pociągów i posterunki ruchu – wypełniają głównie funkcje regulacyjne i kontrolne.⁹

Decyzje regulacyjne podejmowane na najwyższym szczeblu hierarchii dotyczą najwyższej skali zakłóceń, bowiem skali sieci kolejowej. Decyzje te dotyczą regulacji układu potoków pociągów. Po wyłączeniu zagadnień ustalania kolejności pociągów w potokach obejmują one ustalania składu poszczególnych potoków, a więc innymi słowy mówiąc przydzielania drogi poszczególnym pociągom.

Na szczeblu odcinka linii kolejowej decyzje regulacyjne dotyczą średniego poziomu zakłóceń i związane są z regulacją potoku pociągów na odcinku linii kolejowej, czyli ustalania kolejności jazdy poszczególnych pociągów.

⁹ Zob. J. Woch: **Podstawy inżynierii ruchu kolejowego**: WKiŁ, Warszawa, 1983; s. 37 – 38.

Na szczeblu posterunku ruchu decyzje regulacyjne dotyczą małego poziomu zakłóceń i związane są z problemem wyboru torów stacyjnych dla poszczególnych pociągów oraz kolejnością przyjmowania i wyprawiania pociągów z posterunku ruchu.

Na najniższym poziomie hierarchii regulacji – poziomie drużyny lokomotywowej decyzje regulacyjne dotyczą najmniejszego poziomu zakłóceń i związane są z regulacją ruchu pojedynczego pociągu, a w istocie rzeczy zmazane z regulacją prędkości jazdy pociągu.

5. Zakończenie

W niniejszym artykule zostały tylko zasygnalizowane problemy ujęte w ramach inżynierii ruchu kolejowego jako dziedziny nauki i techniki oraz praktyki gospodarczej transportu kolejowego. Każdy z przedstawionych obszarów inżynierii ruchu kolejowego wymaga pogłębionych studiów i publikacji wyników tych studiów. W polskiej literaturze przedmiotu jest bardzo mało pozycji dotyczących tej problematyki.

Bibliografia

1. Chwesiuk K., Zalewski P.: **Technologia transportu kolejowego**; WKŁ, Warszawa, 1987
2. Woch J.: **Podstawy inżynierii ruchu kolejowego**; WKŁ, Warszawa, 1983
3. Wyrzykowski W.: **Ruch kolejowy Tom I**; Wkił, Warszawa, 1965