

Michał Urbaniak

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Marianna Jacyna

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

ORGANIZACJA RUCHU POCIĄGÓW W OBRĘBIE STACJI A OSZCZĘDNOŚĆ ENERGII

Rękopis dostarczono, październik 2016

Streszczenie: W artykule przytoczono podstawowe zasady organizacji ruchu kolejowego. Wyodrębniono elementy sieci kolejowej oraz wskazano obszar stacji kolejowej, jako najistotniejszy z punktu widzenia organizacji ruchu dla celów zmniejszenia zużycia energii trakcyjnej z uwzględnieniem rekuperowanej energii. W dalszej części odwołano się do spotykanych w literaturze rozwiązań sterowania czasem postoju na stacji oraz sterowania czasem jazdy, jako narzędzi umożliwiających maksymalizację wykorzystania energii odzyskiwanej w procesie hamowania. Wskazano wybrane ograniczenia, których spełnienie jest konieczne w przypadku (re)organizacji ruchu kolejowego w obrębie stacji (w tym rozkładu jazdy) dla osiągnięcia rzeczywistych oszczędności.

Słowa kluczowe: transport kolejowy, organizacja ruchu, oszczędność energii

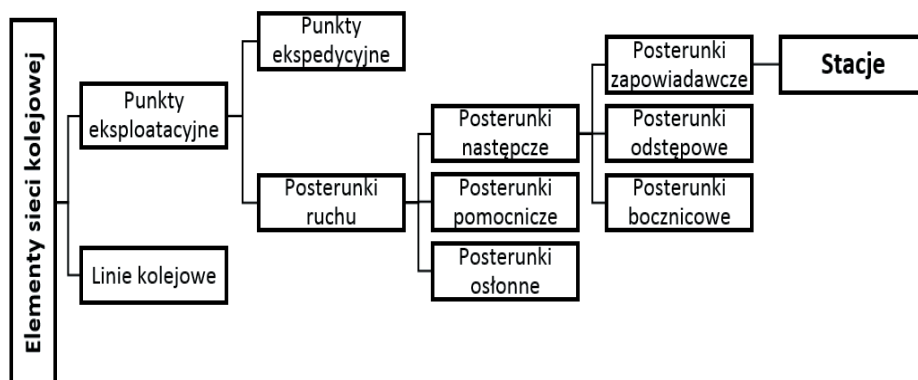
1. WSTĘP

Organizacja ruchu kolejowego jest procesem wiążącym ze sobą problemy występujące na sieci kolejowej dotyczące między innymi:

- ustalania czasów jazdy,
- ustalania miejsc wyprzedzania i krzyżowania się pociągów,
- ustalania kolejności jazdy pociągów,
- w taki sposób, aby ich rozwiązanie przynosiło jak najkorzystniejszy efekt zapewniający racjonalne wykorzystanie dostępnych technologii, środków technicznych oraz personelu do obsługi przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa, komfortu i odpowiedniej oferty przewozowej klientom [4], [8].

Za elementy sieci kolejowej przyjmuje się linie kolejowe oraz rozmieszczone na nich punkty eksploatacyjne (węzły sieci), do których można zaliczyć punkty ekspedycyjne oraz posterunki ruchu – w tym stacje kolejowe (rys. 1). Analizując funkcję ruchową, stację kolejową można określić jako układ torowy wraz z urządzeniami łączności i sterowania ruchem pociągów, który oprócz toru głównego zasadniczego obejmuje co najmniej jeden

tor główny dodatkowy. Ponadto na stacji pociągi mogą rozpoczynać lub kończyć jazdę, krzyżować się i wyprzedzać, a także zmieniać skład lub kierunek jazdy. Skłania to do uznania ich za punkty niezwykle istotne w kontekście organizacji ruchu [8], [10].



Rys. 1. Podział elementów sieci kolejowej
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [10]

Charakterystyka sieci kolejowej oraz jej poszczególnych elementów sprawia, że ruch pojazdów szynowych przemieszczających się po niej również ma zróżnicowany charakter. Zasadniczo każdy przejazd pociągu składa się z czterech podstawowych faz jazdy [7]:

- rozruchu – ruszanie z postoju lub przyspieszanie pociągu do ustalonej prędkości przy odpowiednim poborze energii z sieci trakcyjnej,
- jazdy z prędkością ustaloną – zazwyczaj konieczny jest pobór stałej energii z sieci dla utrzymania założonej prędkości,
- wybiegu – jazdy "z rozpędu" bez poboru energii z sieci,
- hamowania – fazy wytracania prędkości, a co za tym idzie energii, do momentu osiągnięcia prędkości ustalonej (np. ze względu na lokalne ograniczenie) lub do całkowitego zatrzymania, w fazie tej możliwy jest odzysk energii czyli jej tzw. "rekupe-racja".

Zakładając, że przejazd pociągu odbywa się na jednorodnym odcinku pomiędzy obsługiwanymi stacjami należy zwrócić uwagę, że fazy jazdy będące w głównej mierze odpowiedzialne zarówno za wielkość poboru energii oraz możliwość jej odzyskania (rozruch oraz hamowanie) występują przede wszystkim w obrębie stacji kolejowych. Celem niniejszego artykułu jest przegląd zasad organizacji ruchu pociągów w obrębie stacji kolejowej oraz ukazanie, że przy spełnieniu pewnych ograniczeń to właśnie odpowiednia (re)organizacja ruchu na stacjach i/lub w ich otoczeniu może przynieść redukcję kosztów zużycia energii.

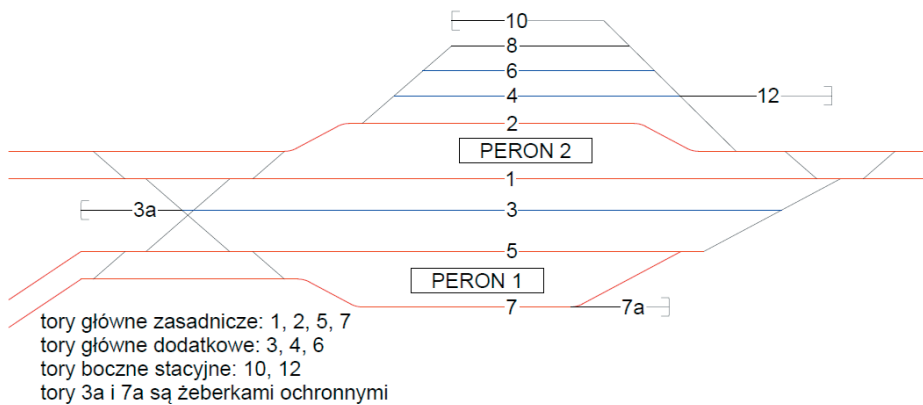
2. ORGANIZACJA RUCHU W OBREBIE STACJI KOLEJOWEJ

2.1. CHARAKTERYSTYKA STACJI KOLEJOWEJ

Z reguły na stacjach występują dwa różne rodzaje ruchu pojazdów. Są nimi ruch pociągów wjeżdżających na stację ze szlaku lub pociągów wyjeżdżających ze stacji na szlak (gdzie ruch odbywa się wyłącznie na torach głównych – zasadniczych i dodatkowych) oraz ruch manewrującego taboru (głównie na torach bocznych) – rys. 2. W artykule skupiono się na ruchu pociągów wykonujących jazdę przez stację, dla których wymogi bezpieczeństwa są znacznie surowsze niż dla pojazdów manewrujących. Wynika to głównie z dwóch faktów [2], [8]:

- pociągi wjeżdżające lub przejeżdżające przez stację zwykle mają większą zarówno prędkość jak i masę w stosunku do pojazdów manewrowych, co uniemożliwia ich odpowiednio szybkie zatrzymanie, a w razie wykolejenia, zderzenia lub innego niekorzystnego zdarzenia powstałe koszty mogą być znaczne,
- w pociągach znajduje się znacznie więcej ludzi (obsługa oraz pasażerowie), którym ze względu na potencjalne zagrożenie życia lub zdrowia w razie wypadku należy zapewnić bezwzględnie możliwie najwyższe bezpieczeństwo.

PRZYKŁAD UKŁADU TOROWEGO NA STACJI



Rys. 2. Przykład układu torowego na stacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2]

Bezpieczny wjazd i/lub przejazd pociągu na/przez stację jest ściśle związany z czasami zajętości poszczególnych torów (tablica 1) i możliwy jest tylko wtedy, gdy spełnione są podstawowe warunki [8]:

- szlak, na który przepuszczany/wyprawiany jest pociąg musi być wolny,
- tor, na który przyjmowany jest pociąg musi być wolny od przeszkód i nie zajęty przez jakikolwiek inny pojazd,
- droga przebiegu pociągu musi być utwierdzona,
- przyjęcie/wyprawienie pociągu zostało zatwierdzone przez dyżurnego ruchu,
- podany jest na semaforze sygnał zezwalający na wjazd pociągu.

Tablica 1

Zestawienie orientacyjnych czasów zajętości torów stacyjnych przez pociągi pasażerskie (ściśle zależne od prędkości pociągów oraz długości torów stacyjnych)

Kategoria pociągów		Czas prze- jazdu t_{prz} [min]	Czas wjazdu t_{wj} [min]	Czas obsł. tech.-han. t_p [min]	Czas wyjazdu t_{wyj} [min]	Czas obsługi na torach postojowych t_o [min]
Dalekobieżne	przechodzące bez postoju	6 ÷ 10	-	-	-	-
	przechodzące z postojem	-	5 ÷ 8	2 ÷ 10	3 ÷ 6	-
	kończą- ce/rozpoczynają ce bieg	-	5 ÷ 8	15 ÷ 30	3 ÷ 6	180 ÷ 360
Miejscowe	przechodzące z postojem	-	5 ÷ 8	2 ÷ 10	3 ÷ 6	-
	kończą- ce/rozpoczynają ce bieg	-	5 ÷ 8	10 ÷ 20	3 ÷ 6	60 ÷ 120
Podmiejskie	przechodzące z postojem	-	4 ÷ 6	2 ÷ 5	3 ÷ 5	-
	kończą- ce/rozpoczynają ce bieg	-	4 ÷ 6	5 ÷ 10	3 ÷ 5	20 ÷ 40

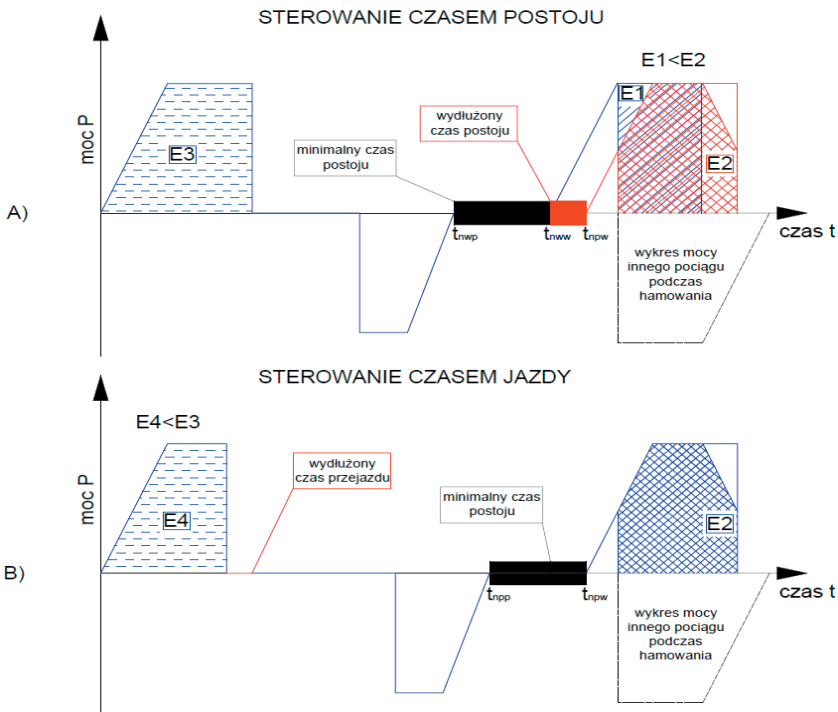
Źródło: opracowanie własne na podstawie [10]

Czasy zajętości torów stacyjnych są jednym z czynników determinujących przepustowość stacji kolejowej. Ponieważ często jest ona punktem krytycznym dla przepustowości całej linii kolejowej dąży się do jak najkrótszych postojów i minimalizacji czasów zajętości torów.

2.2. STEROWANIE CZASEM POSTOJU NA STACJI A STEROWANIE CZASEM JAZDY

Ze względu na swoją rolę stacja kolejowa i przyległy do niej obszar jest miejscem procesów hamowania i rozruchu charakterystycznych dla ruchu kolejowego. Im większe obciążenie stacji przewozami tym większe nasilenie tych procesów, możliwe większe straty energii (hamowanie), większy pobór energii z sieci trakcyjnej podczas prowadzonych rozruchów oraz częstsze występowanie tzw. "power peaks" czyli czasu wyższego zapotrze-

bowania na moc maksymalną, a co za tym idzie wyższe koszty. Uogólniając, organizacyjne rozwiązanie każdego z tych problemów można sprowadzić do zagadnienia odpowiedniej modyfikacji wzorcowych czasów przejazdu (wjazdu na i wyjazdu ze stacji) a wynikających z wstępnie przyjętego rozkładu jazdy pociągów.



Rys. 3. Porównanie oszczędności energii przy zastosowaniu sterowania czasem postoju i czasem jazdy z uwzględnieniem odzysku energii; gdzie: t_{nwp} – najwcześniejszy czas przyjazdu, t_{npp} – najpóźniejszy czas przyjazdu, t_{nww} – najwcześniejszy czas wyjazdu, t_{npw} – najpóźniejszy czas wyjazdu, $E1$ – energia z rekuperacji możliwa do wykorzystania bez uwzględnienia sterowania czasami, $E2$ – energia z rekuperacji możliwa do wykorzystania z zastosowaniem dodatkowego sterowania czasami t_{nwp} , t_{npp} , t_{nww} oraz t_{npw}

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

W literaturze można spotkać dwa różne podejścia do sterowania czasem przejazdu pociągu w celu ograniczenia zużycia energii, maksymalizacji wykorzystania energii wytracanej podczas hamowania odzyskowego i unikania skoków zapotrzebowania na moc (rys. 3).

Rysunek 3A przedstawia metodę umożliwiającą redukcję energochłonności poprzez sterowanie czasem postoju na stacji. Polega to na wykorzystaniu rozkładowej rezerwy czasu (rezerwy eksploatacyjnej) do wydłużenia postoju na stacji (t_{npp}) do momentu aż proces rozruchu pociągu nie spowoduje nadmiernej obciążenia sieci, a ponadto będzie możliwe większe, bądź nawet maksymalne wykorzystanie energii hamowania rekuperacyjnego

innego pojazdu. W praktyce oznacza to opóźnienie wyjazdu ze stacji o taką wartość czasu $\Delta t = t_{npw} - t_{mww}$, aby pole pod wykresem poboru mocy przez pojazd ruszający jak najdokładniej pokrywało się z polem wykresu symetrycznego względem osi czasu dla pociągu hamującego. W rezultacie energia możliwa do wykorzystania z rekuperacji dla wariantu z opóźnieniem wyjazdu ($E1$) może być większa niż energia możliwa do odzyskania z sieci bez takiego zabiegu ($E2$). Do rozwiązania takiego zagadnienia używano już między innymi teorii zbiorów rozmytych [3] czy metod heurystycznych [5], [6].

Rezerwę czasu przejazdu można jednak również zużytkować na innym etapie przejazdu niż postój (rys. 3B). Takim przykładem jest opóźnienie wjazdu na stację (t_{npp}) osiągnięte poprzez sterowanie czasem jazdy wydłużając przejazd pociągu na "wybiegu". Optymalny czas wyjazdu ze stacji ze względu na maksymalne wykorzystanie energii oddawanej przez inny pojazd do sieci otrzymuje się taki jak w pierwszym przypadku. Do rozwiązania zagadnienia sterowania czasem przejazdu używano między innymi Algorytmów Genetycznych [1].

Zyskiwanie w obu przypadkach (sterowania czasem postoju i starowania czasem jazdy) tego samego czasu wyjazdu ze stacji (t_{npw}) świadczy o powtarzalności rozwiązań umożliwiających uniknięcie dużego obciążenia sieci zasilającej oraz maksymalizację wykorzystania odzyskiwanej energii. Należy jednak zwrócić uwagę, że sterowanie czasem jazdy pociągu z opóźnieniem wjazdu na stację poprzez wydłużenie wybiegu i opóźnienie hamowania daje dodatkową korzyść w postaci ograniczenia zapotrzebowania na energię podczas samego przejazdu. Przykładowo skracając czas trwania jazdy z prędkością ustaloną na rzecz wydłużenia czasu jazdy na "wybiegu" (rys. 3) otrzymamy mniejsze zużycie energii w fazie samego przejazdu ($E4 < E3$). Ponadto za wyborem drugiego wariantu przemawiają również zachowania pasażerów, którzy bardziej są skłonni zaakceptować wydłużenie czasu jazdy niż postoju.

2.3. WARUNKI OGRANICZAJĄCE

Głównym czynnikiem ograniczającym możliwość (re)organizacji ruchu na stacjach kolejowych w celu dostosowania do kryterium minimalnego zużycia energii przez pociągi jest maksymalny i minimalny czas zajętości toru (t_{zaj}), na który składają się czas wjazdu (t_{wj}), czas obsługi techniczno-handlowej (t_p) oraz czas wyjazdu (t_{wyj}). Tym samym ważne jest, aby t_{zaj} dążyło do minimum, a co za tym idzie każdy ze składników t_{wj} , t_p , t_{wyj} również dążył do wartości najmniejszych. Nie zaleca się zatem optymalizacji wykorzystania rekuperowanej energii poprzez wydłużanie czasu postoju.

Innym ograniczeniem jest określony rozkładem jazdy najwcześniejszy czas wjazdu na stację (t_{mwwj}) oraz najpóźniejszy czas wyjazdu z niej (t_{npwyj}). Biorąc wcześniej opisaną sytuację, należałoby dążyć do:

- minimalizacji zużycia energii przez pociąg: $E_U \rightarrow \min$
- maksymalizacji wykorzystania energii oddawanej do sieci przez inny pociąg: $E_R \rightarrow \max$,

przy uwzględnieniu, że:

- $t_{zaj} \rightarrow \min$,

- $t_{wj} \leq t_{mwj}$,
- $t_{wyjj} \leq t_{npwyj}$.

Jeżeli przeanalizować dodatkowo możliwe poniesienie strat czasu podczas optymalizacji pod kątem rekuperacji to należy przyjąć zasadę, że:

$$K_{SE} > K_{LT} \quad (1)$$

gdzie:

K_{SE} - koszt zaoszczędzonej energii podany w PLN,

K_{LT} - koszt strat czasu podany w PLN.

Oszacowanie wartości zaoszczędzonej energii jest stosunkowo proste, ponieważ:

$$K_{SE} = E_S \cdot K_E \quad (2)$$

gdzie:

K_E - koszt 1 kWh energii podany w PLN,

E_S - wielkość zaoszczędzonej energii podana w kWh.

Przyjmując koszt 1 kWh energii trakcyjnej na poziomie 0,28144 PLN [4] wówczas K_{SE} będzie równe:

$$K_{SE} = E_S \cdot 0,28144 \text{ [PLN]} \quad (3)$$

Dla obliczenia wartości brutto minuty opóźnienia pociągu pasażerskiego można natomiast zastosować metodę substytucji poprzez wyliczenie wartości utraconych zarobków przez pasażerów [9], [11]. Przyjmując średnie wynagrodzenie brutto w gospodarce narodowej Polski za 2015 rok na poziomie 3 900 PLN [12] oraz przeciętną liczbę godzin pracy w ciągu roku równą 2 016 (wyliczone w oparciu o Dz. U. z 2014 r. poz. 1502), można stwierdzić, że wartość straconej jednej minuty pracy (k_{LT}) dla statystycznego pracownika wyniesie:

$$k_{LT} = \frac{12 \cdot 3900}{2016 \cdot 60} \approx 0,39 \text{ [PLN/min]} \quad (4)$$

Zatem dla pociągu P_i , który będzie przewoził n pasażerów, cena jednej minuty opóźnienia (K_{LT}) wyniesie:

$$K_{LT} = c_k \cdot n \cdot k_{LT} = c_k \cdot n \cdot 0,39 \text{ [PLN/min]} \quad (5)$$

gdzie:

c_k - współczynnik stanowiący stosunek ceny biletu w klasie 2 pociągu wyższej kategorii do kategorii najniższej [11].

Uogólniając, w obszarze sieci kolejowej optymalizowanie rozkładu jazdy na potrzeby maksymalizacji zysków z odzysku energii ma ekonomiczne uzasadnienie tylko wtedy, gdy

suma wartości zaoszczędzonej energii dla n pociągów będzie większa od wartości strat czasu dla tych pociągów:

$$\sum_{i=1}^n K_{SEi} > \sum_{i=1}^n K_{LTI} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n (0,28144 \cdot E_{Si}) > \sum_{i=1}^n (0,39 \cdot c_{ki} \cdot n_i \cdot \Delta_i) \quad (7)$$

gdzie:

Δ_i - wartość opóźnienia podana w minutach,

n - liczba pociągów,

i - kolejny pociąg.

3. WNIOSKI

Stacja kolejowa jest bardzo istotnym elementem na sieci kolejowej nie tylko ze względu na pełnione przez nią funkcje. Jest również obszarem, w którym najintensywniej prowadzone są fazy przejazdu pociągu odpowiedzialne za wielkość zużycia energii trakcyjnej (rozruch) oraz możliwość jej rekuperacji (hamowanie).

W przypadku wykorzystywania technologii rekuperacji energii pojazdu hamującego z powrotem do sieci trakcyjnej i wykorzystania jej przez inny pojazd będący w fazie rozruchu konieczna jest synchronizacja czasów trwania tych procesów. Osiągnąć to można poprzez odpowiednią (re)organizację ruchu sterując czasem postoju lub czasem jazdy. Porównując te dwa rozwiązania należy stwierdzić, że korzystniejsze jest sterowanie czasem jazdy z opóźnieniem przyjazdu na stację. Rozwiązanie to oprócz maksymalizacji wykorzystania odzyskiwanej energii daje dodatkowo możliwość zmniejszenia jej poboru podczas samego przejazdu poprzez wydłużenie wybiegu.

Dostosowując organizację ruchu w obrębie stacji kolejowej, w tym rozkład jazdy należy jednak:

- bezwzględnie zachować wszystkie zasady bezpiecznego prowadzenia ruchu pociągów,
- mieć na uwadze minimalizację czasu zajętości toru stacyjnego mającego bezpośredni wpływ na przepustowość,
- mieć na uwadze wydłużenie wartości czasu samego przejazdu.

Tylko w sytuacji, gdy zysk z zaoszczędzonej energii będzie przewyższał koszt poniesionych strat czasu proponowane rozwiązanie będzie mogło przynosić realne korzyści.

Bibliografia

1. Albrecht T.: *Reducing power peaks and energy consumption in rail transit system by simultaneous train running time control*. Computers in Railways IX 2004, s. 885-894.
2. Basiewicz T., Jacyna M., Rudziński L.: *Linie kolejowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002, s. 87-90.

3. Chang C. S., Phao Y. H., Wang W., Thia B. S.: *Economy/regularity fuzzylogic control of DC railway systems using event-driven approach*. IEE Proc.-Electr Power Appl 143 (1) 1996, s. 9-17.
4. Gołębiowski P.: *Konstruowanie rozkładu jazdy pociągów w warunkach ograniczeń czasowych*. Logistyka 2/2015, s. 189-199.
5. Gordon S. P., Lehrer D. G.: *Coordinated train control and energy management control strategies*. Proc. Of the 1998 ASME/IEEE Joint Railroad Conference 1988, s. 165-176.
6. Guo H. J., Ohashi H., Ishinokura O.: *DC electric train traffic scheduling method considering energy saving – Combination of train traffic parameters for larger regenerative power (In Japanese)*. Transactions IEE Japan 1999, s. 1337-1344.
7. Kwaśnikowski J.: *Elementy teorii ruchu i racjonalizacji prowadzenia pociągów*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2013, s. 43-47.
8. Nowosielski L.: *Organizacja przewozów kolejowych*. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1999, s. 13-26, 36-37, 128-135.
9. Tarski I.: *Czynnik czasu w procesie transportowym*. WKiŁ, Warszawa 1976.
10. Towpik K.: *Infrastruktura transportu kolejowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004, s. 26-37.
11. Wolfenbutg A.: *Optymalne kierowanie ruchem pociągów w obszarze sieci kolejowej*. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Gorzów Wielkopolski 2011, s. 65-69.
12. Dostęp on-line 15.02.2016: www.wynagrodzenia.pl

RAILWAY TRAFFIC MANAGEMENT AT THE STATION AREA IN THE CONTEXT OF SAVING ENERGY

Summary: The article presents the basic principles of the railway traffic management. Shown elements of the railway network. Indicated area of the railway station as one of the most important points from the point of view of the traffic management for the purpose of reducing the energy consumption taking into account the recuperation. Next, made a reference to the literature solutions based on controlling the stopping times at stations and control the running time as a tool to maximize the using of recovery energy. At the end indicated some constraints, fulfillment of which is necessary during the (re)organization of railway traffic within the station (including schedules) to achieve real savings.

Keywords: railway transport, traffic management, energy saving