

dr hab. inż. Kazimierz Kłosek

Prof. nzw. Politechniki Śląskiej, Kierownik Katedry Dróg i Mostów

dr inż. Anna Olma

Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej

Gliwice, Polska

WAHANIA NATĘŻEŃ RUCHU DROGOWEGO NA SIECI DRÓG MIEJSKICH

FLUCTUATIONS IN TRAFFIC INTENSITY ON MUNICIPAL ROAD NETWORK

Streszczenie

W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne określenia współczynników przeliczeniowych dla potrzeb szacowania natężenia ruchu drogowego. Przedmiotowe współczynniki są niezbędne do szacowania SDR na podstawie krótkotrwałych wrywkowych pomiarów ruchu dla dróg w obszarach miejskich.

Określenie współczynników przeliczeniowych do szacowania natężeń ruchu drogowego w obszarach miejskich bazuje na:

- ciągłym pomiarze ruchu drogowego na wlotach kilkudziesięciu skrzyżowań w różnych miastach Polski, wykonanym w latach 2003 i 2004,
- wyznaczeniu współczynników przeliczeniowych szacowania natężeń ruchu, w tym wskaźników sezonowej, tygodniowej i dobowej zmienności ruchu niezbędnych do szacowania SDR z pomiarów wrywkowych na podstawie kilku metod, w tym zgodnie z definicją GDDKiA oraz na podstawie modeli szeregów czasowych.

Abstract

The scope of the paper is the theoretic determination of the calculation coefficients for estimating traffic intensity. The coefficients are essential for the estimation of Medium Daily Traffic on the grounds of short-term arbitrary measurements of traffic intensity in urban areas. The determination of calculation coefficients for estimating traffic intensity in urban areas is based on the following factors:

- continuous measurement of road traffic at the inlets of several cross-roads in numerous Polish cities, taken in 2003 and 2004;
- designation of calculation coefficients for estimating traffic intensity, including seasonal, weekly and daily variability of traffic essential for determining medium daily traffic from accidental measurements on the basis of certain methods, in accordance with GDDKiA definition and time series models.

1. Wstęp

Pomiary ciągłe ruchu drogowego na sieci dróg dają możliwość opisanie charakterystyk wahań ruchu, jego wzrostu, trendów, regularności.

Szczegółowe charakterystyki zmian ruchu wykorzystywane są do ustalenia m.in. miarodajnych godzinowych natężeń ruchu i Średniodobowego Natężenia Ruchu (SDR), które stanowią podstawę do m.in.: planowania sieci komunikacyjnej miejskiej i zamiejskiej, zarządzania, utrzymania i określenia pracy przewozowej, projektowania dróg i skrzyżowań, konstrukcji nawierzchni, projektowania organizacji ruchu, oceny przepustowości i warunków ruchu, oceny oddziaływania dróg na środowisko, analiz ekonomicznych, wypadkowości itp. Systematyczne analizy pozwalają na uzyskanie typowych profili miesięcznych, tygodniowych i dobowych wahań natężeń ruchu w zależności od charakteru ruchu i lokalizacji drogi w sieci komunikacyjnej. Z profili wahań natężeń ruchu uzyskuje się wskaźniki (współczynniki przeliczeniowe) wahań sezonowych W_M , tygodniowych W_T i wskaźniki dobowej zmienności ruchu W_{ZD} . Te zaś, pozwalają na szacowanie średniodobowego natężenia ruchu (SDR) na podstawie krótkotrwałych, wyrwykowych pomiarów ruchu.

Wskaźniki zmienności ruchu dla dróg w terenach miejskich obliczono na podstawie uzyskanych pomiarów ciągłych wykonany w ciągu roku 2003 i 2004. Monitorowano 14 skrzyżowań sterowanych akomodacyjną sygnalizacją świetlną zlokalizowanych w 4 miastach: w Łodzi, Bytomiu, Zabrze i Zawierciu z wykorzystaniem Systemu Zdalnej Kontroli i Zbierania Danych SNS/ASR. Uzyskano w ten sposób ciągły pomiar natężenia ruchu na 47 wlotach skrzyżowań w przekrojach oddalonych o ok. 40 ÷ 70 m od linii warunkowego zatrzymania.

Wskaźniki zmienności ruchu dla dróg w terenach miejskich wyznaczono za pomocą klasycznych, uproszczonych metod wyznaczania współczynników przeliczeniowych (zgodnie z definicją GDDKiA) oraz na podstawie modeli szeregów czasowych.

2. Definicje wskaźników zmienności ruchu (wg GDDKiA)

Wskaźnik wahań sezonowych W_M to iloraz średniego dobowego ruchu w miesiącu do średniego dobowego ruchu w roku jest określany z zależności:

$$W_M = \frac{SDR_{Mi}}{SDR} \quad (1)$$

gdzie: SDR_{Mi} - średnio dobowy ruch i -tego miesiąca [P/dobę],
 SDR - średnio dobowy ruch w roku [P/dobę].

Wskaźnik wahań tygodniowych W_T to iloraz średniego dobowego ruchu dnia tygodnia do średniego dobowego ruchu w roku:

$$W_T = \frac{SDR_{Ti}}{SDR} \quad (2)$$

gdzie: SDR_{Ti} - średnio dobowy ruch i -tego dnia tygodnia [P/dobę],

Współczynniki dobowej zmienności ruchu W_{ZD} są sumą \bar{U}_i procentowych udziałów natężenia ruchu z Δh godzin w całodobowym natężeniu ruchu:

$$W_{ZD} = \sum_{n=1}^{\Delta h} \bar{U}_i \quad [\%] \quad (3)$$

Procentowy udział natężenia ruchu z i -tej godziny w całodobowym natężeniu ruchu wyznacza się:

$$\bar{U}_i = \frac{N_i}{N_{\text{dob}}} \quad [\%] \quad (4)$$

\bar{U}_i	–	procentowy udział natężenia ruchu z i -tej godziny w całodobowym natężeniu ruchu,
N_i	–	wartość natężenia w i -tej godzinie,
N_{dob}	–	natężenie dobowe.

3. Zastosowane modeli szeregów czasowych

Teoria szeregów czasowych daje możliwości modelowania różnorodnych, bardzo specyficznych procesów oraz ich prognozowania. Wykorzystanie dostępnych w momencie t obserwacji szeregu dla prognozy jego wartości w przyszłym momencie $t+l$ stanowi podstawę do planowania m.in. w ekonomii, transporcie itp. Modele stosowane do opisu wahań natężeń ruchu drogowego powinny być oparte o realistyczne założenia, w podobnych warunkach socjoekonomicznych.

Szereg czasowy określa się jako realizację pewnego procesu (stochastycznego), w którym kolejne obserwacje zmieniają się w następujących po sobie jednostkach czasowych w sposób losowy. Oznaczając przez t (gdzie $t = 1, 2, \dots, n$) momenty przedziału czasu, w których obserwowano wartości pewnej zmiennej, a przez y_t - wyniki obserwacji, szereg czasowy można zapisać jako zbiór:

$$\{y_t ; t = 1, 2, \dots, n\}. \quad (5)$$

Do wyznaczenia wskaźników zmienności wahań ruchu wykorzystano jednorównaniowe modele ekonometryczne – adaptacyjne i klasyczne modele trendu.

Spośród adaptacyjnych modeli trendu wykorzystano:

- model średniej ruchomej, a w tym:
 - model średniej ruchomej prostej do wyznaczenia wskaźników tygodniowej zmienności ruchu - W_T ,
 - model średniej ruchomej scentrowanej do wyznaczenia wskaźników sezonowych W_M i procentowego udziału natężenia ruchu i -tej godziny w całodobowym ruchu \bar{U}_i , które stanowią podstawę do wyznaczenia wskaźników dobowej zmienności ruchu W_{ZD} .
- multiplikatywną metodą Wintersa - (wskaźniki tygodniowej zmienności ruchu - W_T).

Klasycznymi modelami trendu (metodami analitycznymi) – multiplikatywną metodą wskaźników sezonowości i metodą dopasowania funkcji trendu wg metody najmniejszych kwadratów określono wskaźniki wahań natężeń ruchu drogowego – W_M , W_T oraz procentowego udziału natężenia ruchu i -tej godziny w całodobowym ruchu \bar{U}_i .

Wyznaczenie wskaźników różnymi modelami miało na celu optymalne dopasowanie modelu szeregu teoretycznego do szeregu empirycznego przy jak najmniejszym miarach błędów niżej podanych.

Model średniej ruchomej, prostej z nieparzystą liczbą sąsiadujących ze sobą wyrazów przyjmuje postać:

$$\hat{y}_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{r=-q+1}^{q-1} y_{t+r} \quad (t = q+1, q+2, \dots, n-q) \quad (6)$$

gdzie:

- \hat{y}_t - teoretyczna wartość zmiennej w szeregu y_t wyznaczona na moment lub okres t ,
- y_t - rzeczywista wartość zmiennej w szeregu w momencie lub okresie t ,
- q - ustalona liczba naturalna.

Model średniej ruchomej scentrowanej o parzystej liczbie podokresów wyraża się wzorem:

$$\hat{y}_t = \frac{1}{2q} \left[\frac{1}{2} y_{t-q} + \sum_{r=-q+1}^{q-1} y_{t+r} + \frac{1}{2} y_{t+q} \right] \quad (t = q + 1, q + 2, \dots, n - q) \quad (7)$$

gdzie:

\hat{y}_t - teoretyczna wartość zmiennej w szeregu y_t wyznaczona na moment lub okres t ,

y_t - rzeczywista wartość zmiennej szeregu w momencie lub okresie t ,

$q = d/2$, d – liczba podokresów w cyklu wahań.

Klasyczna metoda wyodrębniania trendu polega na dopasowaniu określonej funkcji matematycznej do badanego szeregu czasowego. Parametry funkcji trendu otrzymuje się metodą najmniejszych kwadratów, a odpowiednia krzywa jest dopasowana do zbioru obserwacji $\{y_t ; t = 1, 2, \dots, n\}$. Do opisu tendencji rozwojowej zmienności godzinowych natężeń ruchu, dobowych i rocznych zastosowano funkcję liniową.

Rozmiary wahań sezonowych ustala się statystycznie obliczając wskaźniki sezonowości wyrażone w procentach lub jednostkach bezwzględnych (absolutnych). Wskaźniki wyrażone w procentach występują w modelu multiplikatywnym, natomiast wskaźniki absolutne w modelu addytywnym. Wahania okresowe multiplikatywne występują wówczas, gdy w poszczególnych podokresach badane zjawisko odchyła się od swojego przeciętnego poziomu o stałą wielkość względną.

Model multiplikatywny daje względne – procentowe wskaźniki sezonowości W_M i W_T , które przyjmują wartości zbliżone do wartości wskaźników wyznaczonych zgodnie z definicją. Ponadto przy parametrze „a” trendu dążącym do zera, uzyskuje się „stałe” odchylenia od trendu w ciągu całego roku.

Do wyznaczenia wskaźników sezonowości wykorzystano metodę polegającą na wyznaczeniu dla poszczególnych faz cyklu wskaźników sezonowości lub bezwzględnych wahań sezonowych.

Multiplikatywny model szeregu przyjmuje wówczas postać:

$$y_{ti} = f(t_{li})w_i + \xi_{ti} \quad (8)$$

gdzie:

y_{ti} – wartość szeregu czasowego w okresie (momencie) t_{li} , przy czym $t_{li} = m(l - 1) + i$ ($l = 1, \dots, N$, $i = 1, \dots, m$), czyli wartość w l -tym cyklu i -tej fazy,

f – funkcja trendu opisująca tendencję rozwojową,

w_i – wskaźnik sezonowości dla i -tej fazy każdego cyklu,

ξ_{ti} – składnik losowy (zaburzenie).

Wyznaczenie wskaźników sezonowych przebiega wieloetapowo poprzez:

- wyodrębnieniu funkcji trendu f – metodą najmniejszych kwadratów,
- wyeliminowanie trendu z szeregu ; otrzymuje się wówczas wartości u_{ti} zawierające wahania sezonowe i przypadkowe:

$$u_{ti} = \frac{y_{ti}}{\hat{y}_{ti}} \quad (t_{li} = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

- wyznaczenie surowych wskaźników sezonowości wg wzoru:

$$w_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N u_{li} = \frac{1}{N} (u_{1i} + u_{2i} + \dots + u_{Ni}) \quad (10)$$

gdzie: N – liczba okresów (cykli), m – liczba faz w cyklu (liczba sezonów).

- wyznaczenie czystych wskaźników sezonowości – surowe wskaźniki sezonowości koryguje się dzieląc każdy z nich przez ich średnią arytmetyczną – ich suma powinna być równa lub bliska ‘m’ :

$$w_i = \frac{w_{0i}}{w_0} \quad (11)$$

Wskaźniki w_i odpowiadają wskaźnikom W_T , W_M , oraz procentowemu udziałowi natężenia ruchu z i -tej godziny w całodobowym ruchu \bar{U} .

Jako trzecią metodę opisaną zmian w ciągu roku modelem szeregów czasowych zastosowano *metodę Wintersa*. Metoda ta należy do modeli adaptacyjnych, które mają dużą elastyczność i zdolność dostosowawczą w przypadku nieregularnych zmian kierunku trendu bądź zniekształceń i przesunięć wahań periodycznych (np. sezonowych) – zmienne mają dość labilny przebieg w czasie np. wahania natężeń dobowych w ciągu roku.

Metoda Wintersa jest jedną z metod wygładzania wykładniczego stosowana jest do wygładzania szeregów czasowych, w których elementami składowymi są trend liniowy, wahania okresowe oraz wahania przypadkowe. Poszczególne składniki obliczane są jako ważone sumy wartości bieżących oraz wartości historycznych.

W wersji multiplikatywnej zakłada się, że każda wartość szeregu czasowego jest iloczynem wartości z wykluczoną sezonowością oraz indeksu sezonowości dla danego okresu, a przyrosty względne wartości trendu zmiennej Y_t , są w przybliżeniu stałe lub zmieniają się w sposób regularny.

Model Wintersa w wersji multiplikatywnej przedstawia się następująco:

$$\begin{cases} F_r = \frac{1}{r} \sum_{t=1}^r y_t \\ F_t = \alpha \left(\frac{y_t}{C_{t-r}} \right) + (1-\alpha) \cdot (F_{t-1} + S_{t-1}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} S_r = \frac{1}{r} (y_r - y_1) \\ S_t = \beta (F_t - F_{t-1}) + (1-\beta) \cdot S_{t-1} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_t = 1, \quad t \in \overline{1, r} \\ C_t = \gamma \left(\frac{y_t}{F_t} \right) + (1-\gamma) \cdot C_{t-r} \end{cases} \quad (14)$$

gdzie: F_t – ocena wartości średniej zmiennej Y w czasie t ,
 S_t – ocena zmiany trendu zmiennej Y w czasie t ,
 C_t – ocena efektu sezonowości zmiennej Y w czasie t ,
 r – liczba faz cyklu sezonowego,
 α, β, γ – parametry wygładzania, których wartości należą do przedziału $[0;1]$.

Wygładzanie szeregu dobiera się tak, aby wartości błędów popełnianych przy wygładzaniu były zminimalizowane. Badając miarę dopasowania rozpoznaje się prawidłowości występujące w podzbiorze inicjalnym i oblicza się wartości teoretyczne dla podzbioru kontrolnego.

Porównanie wartości teoretycznych z wartościami empirycznymi uzyskuje się przez obliczenie miar dokładności dopasowania szeregu wygładzonego do szeregu empirycznego, w tym m.in.: błąd procentowy w chwili t , błąd średni - ME, średni błąd procentowy - MPE oraz wskaźnik względnego poziomu reszt v_e , odchylenie standardowe σ i współczynnik zmienności losowej v .

Wadą powyższych miar jest to, że dodatnie odchylenia wartości empirycznych od wartości teoretycznych są znoszone przez ujemne odchylenia. Miarami, które eliminują tę niedogodność są miary błędów bezwzględnych: średni błąd bezwzględny - MAE, średni bezwzględny błąd procentowy – MAPE.

Jeżeli wartości bezwzględne z miar błędów ME i MAE są sobie równe, to wartości teoretyczne są systematycznie niższe lub wyższe od wartości rzeczywistych. Jeśli natomiast wartości ME i MPE są zdecydowanie niższe niż MA i MAPE, to błędy wygładzania są różnokierunkowe. Miarą uwypuklającą szczególnie duże błędy jest średni błąd kwadratowy – MSE.

Współczynnik Theila przyjmuje wartość 0, gdy wartości teoretyczne pokrywają się z wartościami empirycznym:

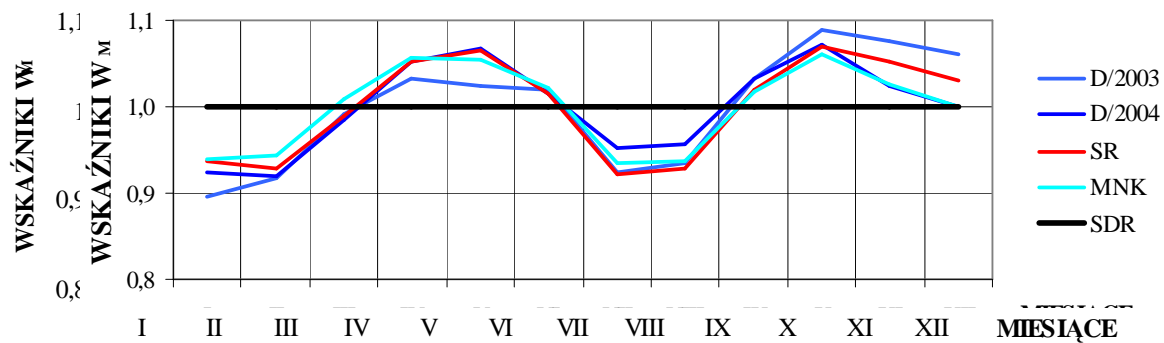
$$I^2 = \frac{\sum_{t=n+1}^T (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=n+1}^T y_t^2} \quad (15)$$

Pierwiastek ze współczynnika Theila informuje, jaki jest przeciętny względny błąd dopasowania wartości teoretycznych do wartości empirycznych dla analizowanych okresów.

4. Wyniki przykładowych analiz

4.1. Miesięczne wahania ruchu

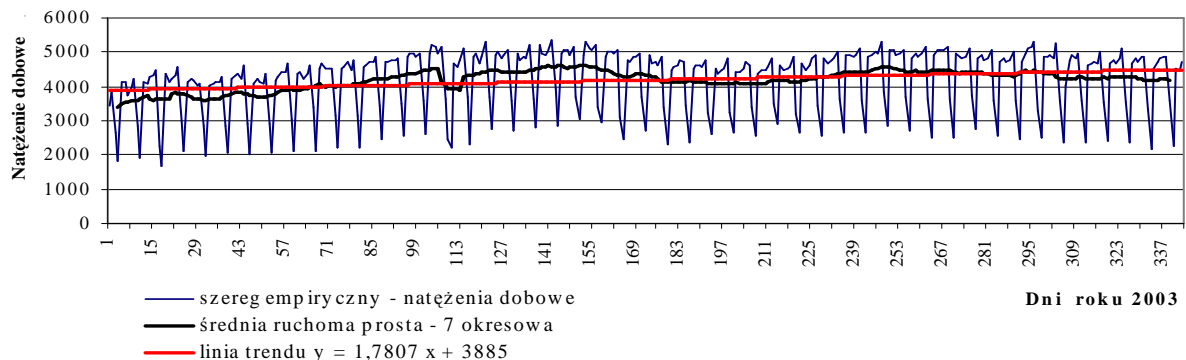
Na podstawie przeprowadzonych analiz modelami szeregów czasowych i definicji uzyskano wskaźniki wahań ruchu dla na sieci dróg w obszarach miejskich.



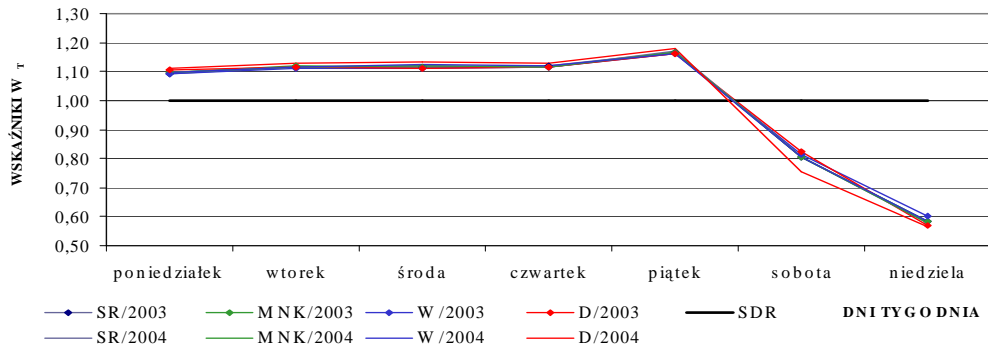
Rys. 1. Porównanie wartości wskaźników sezonowych wahań ruchu W_M wyznaczone wg średniej ruchomej (SR), dopasowania funkcji trendu metodą najmniejszych kwadratów (MNK) oraz definicji GDDKiA z roku 2003 (D/2003) i 2004 (D/2004).

Charakter wahań natężeń ruchu drogowego w terenie miejskim jest odmienny od charakteru wahań ruchu na zamiejskich drogach krajowych. Na drogach krajowych rejestruje się znacznie większy średni dobowy ruch w okresie wakacyjnym niż średni dobowy ruch w roku, natomiast na drogach w obszarach miejskich średni dobowy ruch w okresie wakacyjnym jest niższy od SDR w roku. Z analizy obliczeń wynika, że uzyskane metodą najmniejszych kwadratów (MNK) bardzo małe wartości wskaźnika względnego poziomu reszt v_e i współczynnika zmienności losowej v , świadczą o dobrym dopasowaniu modelu do danych rzeczywistych, a wskaźniki W_M mają wartości pośrednie pomiędzy wskaźnikami W_M wyznaczonymi według definicji z roku 2003 i 2004.

4.2. Tygodniowe wahania ruchu.



Rys. 2. Wahania dobowego natężenia ruchu w wybranym przekroju dla 2003r. wraz z szeregiem wygładzonym średnią ruchomą 7-okresową i trendem liniowym.

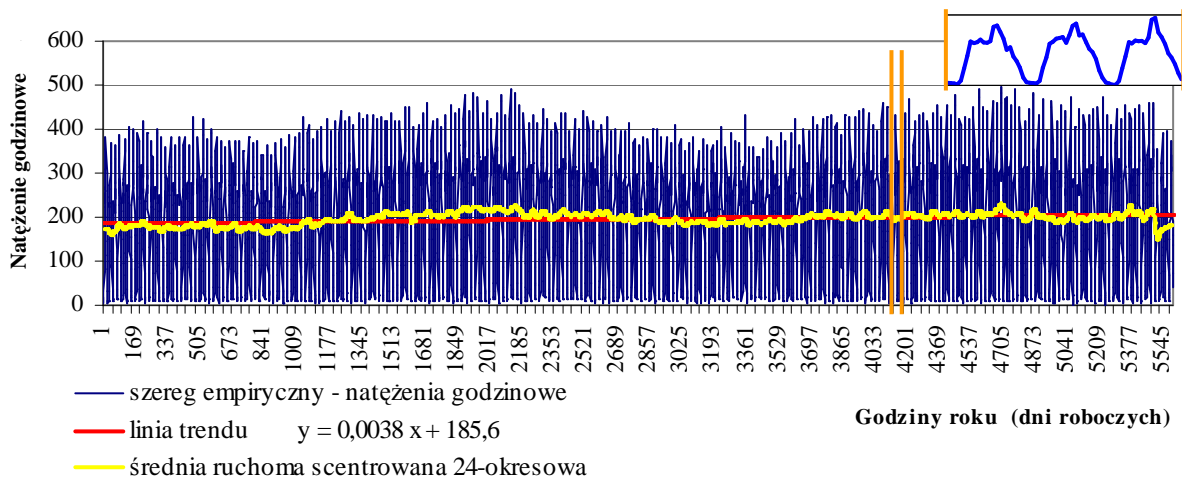


Rys.3. Porównanie wartości wskaźników tygodniowych wahań ruchu W_T wyznaczonych wg średniej ruchomej (SR), dopasowania funkcji trendu metodą najmniejszych kwadratów (MNK), metodą Wintersa (W) oraz wg. definicji (D) z roku 2003 i 2004.

Na drogach w terenie miejskim SDR w dniach roboczych od poniedziałku do czwartku przyjmuje zbliżone wartości. Na drogach krajowych zbliżone wartości posiada średni dobowy ruch od wtorku do czwartku, natomiast średni dobowy ruch w poniedziałki jest zbliżony do SDR w roku. Średni dobowy ruch w piątki zarówno na drogach w terenie miejskim jak i zamiejskim przyjmuje największe wartości.

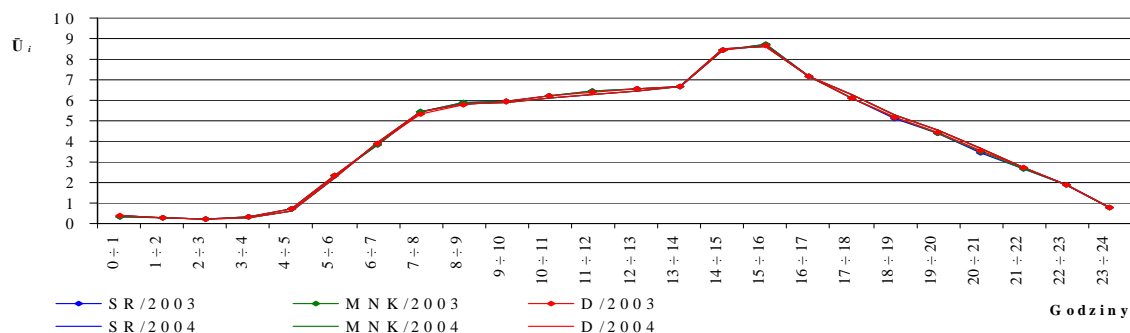
Posługując się przyjętymi modelami uzyskano wartości wskaźników tygodniowej zmienności ruchu W_T bardzo zbliżone do wyznaczonych zgodnie z definicją. Najlepsze dopasowanie do rzeczywistych danych uzyskano za pomocą modelu średniej ruchomej 7-okresowej – mniejsze wskaźniki v_e . Również wartości współczynników Theil'a zbliżone do zera, świadczą o bardzo dobrym dopasowaniu wartości teoretycznych do wartości empirycznych szeregu.

4.3. Dobowe wahania ruchu.



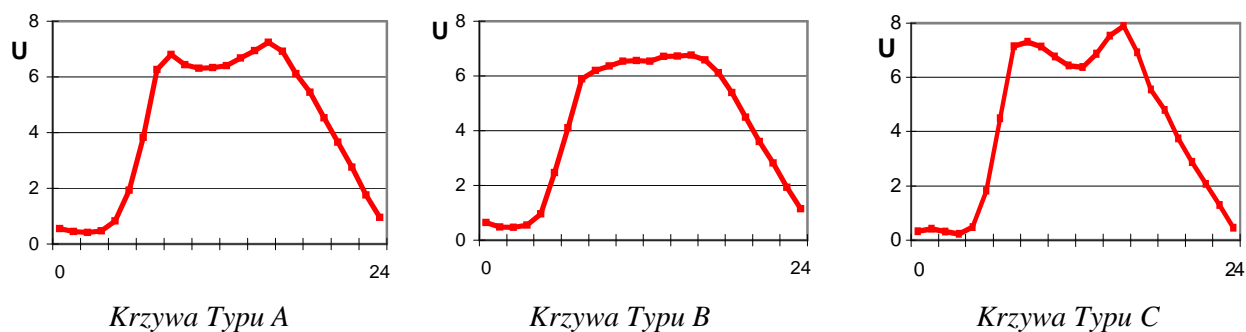
Rys. 4. Godzinowe wahania natężenia ruchu w roku 2004 wraz trendem liniowym i szeregiem wygładzonym średnią ruchomą 24-okresową.

Przyjętymi modelami uzyskano wartości procentowego udziału natężenia ruchu i -tej godziny w całodobowym ruchu \bar{U}_i bardzo zbliżone do wyznaczonych zgodnie z definicją. Najlepsze dopasowanie do rzeczywistych danych uzyskano za pomocą modelu średniej ruchomej scentrowanej 24-okresowej – najmniejsze wskaźniki v_e , σ i v .



Rys. 5 Porównanie wartości procentowego udziału natężenia ruchu i -tej godziny w całodobowym ruchu \bar{U}_i wyznaczonych wg średniej ruchomej (SR), dopasowania funkcji trendu metodą najmniejszych kwadratów (MNK) oraz definicji (D) w wybranym punkcie pomiarowym.

Na podstawie uzyskanych, średnich dobowych wahań ruchu na wszystkich badanych wlotach, dokonano podziału rozkładów na 3 typowe krzywe dobowego rozkładu natężeń ruchu.



Rys. 6. Typy rozkładów dobowych wahań ruchu.

Typy rozkładów cechuje zróżnicowany przebieg zmian natężeń ruchu w zakresie godzin szczytowych (rannych i popołudniowych) i zmiany natężeń pomiędzy godzinami szczytu (stosunek poziomu natężeń w godzinach między szczytowymi do natężenia w szczycie):

- Typ A charakteryzuje się dwoma szczytami ruchu.
- Typ B to brak szczytów, natężenia ruchu w godzinach dziennych ($8^{00} \div 16^{00}$) utrzymują się na względnie stałym poziomie,
- Typ C to krzywa wahań dobowych z wyraźnym szczytem popołudniowym.

Przyjęte typy krzywych rozkładów dobowych mogą charakteryzować ruch na drogach zlokalizowany zarówno w centralnych i pośrednich częściach miast jak i na obrzeżach.

5. Wnioski

W pracy wykazano, że modelami szeregów czasowych można opisać zmiany natężeń ruchu w ciągu roku, wyznaczyć zarówno tendencje rozwojowe, jak i wskaźniki zmienności ruchu m.in. sezonowej (W_M) i tygodniowej (W_T) oraz wskaźniki procentowego udziału natężenia ruchu i -tej godziny w całodobowym ruchu \bar{U}_i , jak i wahania przypadkowe.

Przeprowadzone analizy i porównania z wartościami wskaźników wyznaczonymi zgodnie z definicją GDDKiA wskazują, że przyjęta w pracy metodologia badań jest właściwa. Kontynuacja pomiarów i analiz ruchu oraz wahań natężeń średniodobowych na sieci dróg miejskich stanowić będą podstawę do określenia tendencji rozwojowej ruchu jak i celów prognostycznych. Powinna ona umożliwić jednoznaczne przypisanie typowych rozkładów dobowych od funkcji drogi (ulicy) i jej lokalizacji w układzie komunikacyjnym miasta.