

УДК 656.13.05

**О. М. Дудніков, канд. техн. наук, доц., Я. С. Навроцька**

**Автомобільно-дорожній інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Горлівка**

### **УРАХУВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІВОПОВОРОТНОГО РУХУ ІЗ ЗУСТРІЧНИМ РУХОМ У СВІТЛОФОРНОМУ РЕГУЛЮВАННІ**

*Розглядається проблема підвищення безпеки дорожнього руху на перехрестях доріг на одному рівні зі світлофорним регулюванням, яка включає в себе одну з головних задач: урахування кінематичних характеристик лівоповоротного руху у світлофорному регулюванні на міських пересіченнях. Сформульовано теоретичні основи організації лівоповоротного руху за його кінематичними характеристиками з урахуванням зустрічного руху та руху пішоходів у двофазному світлофорному регулюванні на міських пересіченнях на одному рівні, а також сформульовано відповідну методику уточненого розрахунку сумарної тривалості основного та проміжного тактів відповідних фаз регулювання. Синтезовану методику обґрунтовано експериментально.*

#### **Постановка наукової проблеми та задачі, що вирішується**

Сучасний стан безпеки дорожнього руху в Україні вважається одним із найгірших в Європі. Сучасні статистичні дані щодо наявних показників аварійності вказують на 75 % дорожньо-транспортних пригод (ДТП), які відбуваються на перехрестях міських вулиць, від усіх ДТП на вулично-дорожній мережі [1–4].

Уведення світлофорного регулювання, як методу регулювання у вигляді вимоги розділення транспортних та пішохідних потоків у часі, сприяє суттєвому зменшенню кількості конфліктних точок на площі перехрестя, у середньому до 70...90 %. Але після введення світлофорного регулювання спостерігається невідповідне зменшення кількісних показників аварійності на відповідному перехресті. Тобто виникає гіпотеза, що введення світлофорного регулювання спричиняє появу додаткових ДТП, що трапилися за причин недосконалої впливів світлофорного об'єкта на рух відповідних транспортних та пішохідних потоків.

Зараз найбільш розповсюджені світлофорні об'єкти, які обладнані двофазним світлофорним регулюванням [1, 4]. Найбільш складним маневром на перехресті з відповідним двофазним світлофорним регулюванням є маневр виконання повороту ліворуч в умовах наявності зустрічного транспортного потоку та відповідних пішохідних потоків на конфліктних напрямках. Вирішення проблеми забезпечення належного рівня безпеки дорожнього руху неможливе без відповідної організації маневрів повороту ліворуч. ДТП в умовах повороту ліворуч – це здебільшого зустрічні зіткнення, що мають максимальні показники тяжкості. Організація лівоповоротного руху у вигляді відповідної фази особливо важлива при значній інтенсивності цього руху та відповідного зустрічного руху, але у в сучасних вимогах теоретичною основою вказаної організації є тільки норма 120 авт/год [3] інтенсивності лівоповоротного руху, при перевищенні якої приймається рішення щодо організації окремої фази регулювання відповідного маневру. Інші характеристики умов руху у організації світлофорного регулювання не враховуються.

Постає **наукова задача**: врахувати кінематичні характеристики лівоповоротного руху із зустрічним рухом у світлофорному регулюванні.

### *Аналіз останніх досліджень*

Сучасні схеми організації руху на регульованих пересіченнях досліджені досить добре [1, 4]. Однак в умовах щільних транспортних потоків є ситуації, що пов'язані з виконанням лівих поворотів, при яких упродовж зеленого сигналу відповідного напрямку не з'являється можливість руху на лівому повороті. Для вказаних умов застосовують методи організації руху на лівому повороті [1, 3, 4]: організація лівих поворотів методом просочування; організація лівих поворотів методом відсічення; організація лівих поворотів методом ущільнення; організація окремої фази регулювання; організація віддалених від пересічення лівих поворотів; організація об'їзду лівого повороту за іншим маршрутом; заборона лівих поворотів.

Найбільш ефективним та відповідно розповсюдженим методом організації руху на лівих поворотах перехрестя зі світлофорним регулюванням є метод виокремлення фази світлофорного регулювання для забезпечення безперешкодного руху транспортних засобів. Інші методи з указаних передбачають значні витрати або невідповідним чином забезпечують безпеку руху на лівих поворотах. Організація трьох фаз світлофорного регулювання на перехрестях доріг та вулиць у класичному випадку передбачає виокремлення третьої фази в умовах значних інтенсивностей лівоповоротних та пішохідних потоків, про що вказує Ю. А. Кременець [1].

Автор указує, що відповідно до середньої тривалості існуючих циклів із двома фазами регулювання, лівоповоротну фазу можливо не вводити при інтенсивності руху лівоповоротного потоку до 120 автомобілів за годину. Додатково необхідно вказати, що Ю. А. Кременець рекомендує, що в умовах незначних інтенсивностей зустрічного потоку прямого напрямку максимальна інтенсивність лівоповоротного потоку 120 авт/год може бути збільшена пропорційно відношенню інтенсивностей зустрічного та побіжного потоків у прямому напрямку [1]. У вказаному випадку тривалість фази буде визначатися інтенсивністю потоку побіжного напрямку [1]. При цьому в зустрічному напрямку з'являється надлишок тривалості зеленого сигналу, що поліпшує завершення лівоповоротної фази.

З урахуванням зустрічного руху прямого напрямку відносно лівоповоротного потоку організацію руху транспортних засобів указаного лівоповоротного потоку можливо розділити на два підходи: організацію лівоповоротного потоку в умовах наявності розривів у зустрічному потоці прямого напрямку в межах відповідної фази світлофорного регулювання; організацію лівоповоротного потоку в умовах відсутності розривів у зустрічному потоці прямого напрямку в межах відповідної фази світлофорного регулювання. Перший підхід повинен реалізовуватися на практиці за рахунок часу тривалості основного такту та проміжного такту відповідної фази світлофорного регулювання. Другий підхід повинен реалізовуватися на практиці за рахунок часу тривалості проміжного такту відповідної фази регулювання. В умовах, коли часу фази регулювання недостатньо для роз'їзду черги транспортних засобів, що чекають повороту наліво, необхідно організувати третю фазу світлофорного регулювання для забезпечення відповідного руху транспортних засобів наліво.

Таким чином, для забезпечення якісної організації руху на лівих поворотах перехрестя доріг та вулиць зі світлофорним регулюванням необхідно розробити методичку перевірконого розрахунку умов наявності необхідного часу проїзду черги транспортних засобів, що утворилася впродовж часу заборони лівоповоротного руху, за тривалість: основного такту та проміжного, проміжного такту фази регулювання та за тривалість наявної фази лівоповоротного руху зі своїми основним та проміжним тактами.

### *Мета роботи*

Метою роботи є розробка методички врахування кінематичних характеристик лівоповоротного руху із зустрічним рухом у світлофорному регулюванні, яка дозволяє організувати основні та відповідні проміжні такти світлофорного регулювання з

урахуванням можливості проїзду лівоповоротних із зустрічними потоками та відповідного пропуску пішохідних потоків, що рухаються в конфліктних напрямках до повороту ліворуч.

### Основна частина

Урахування кінематичних характеристик лівоповоротного руху із зустрічним рухом у світлофорному регулюванні пропонується провести за значеннями часу на рух черг, що утворилися впродовж червоного сигналу світлофора на зустрічному напрямку, на напрямку повороту ліворуч та врахувати при цьому пішохідний рух.

Кількість транспортних засобів, що утворили чергу в очікуванні лівого повороту, пропонується розраховувати за наступною формулою:

$$(n_{.m})_{i,j} = (t_u)_j \cdot (N_{.m})_{i,j} = ((t_o)_{j-1} + (t_n)_{j-1}) \cdot (N_{.m})_{i,j}, \quad (1)$$

Де  $(n_{.m})_{i,j}$  – кількість транспортних засобів, що утворили чергу в очікуванні лівого повороту на  $i$ -тому напрямку у  $j$ -тій фазі світлофорного регулювання, од.;

$(t_u)_j$  – тривалість червоного сигналу у  $j$ -тій фазі світлофорного регулювання, с;

$(N_{.m})_{i,j}$  – інтенсивність руху транспортних засобів, що будуть виконувати лівий поворот на  $i$ -тому напрямку у  $j$ -тій фазі світлофорного регулювання, авт./с;

$(t_o)_{j-1}$  – тривалість основного такту в попередній фазі ( $j-1$ ) світлофорного регулювання, с;

$(t_n)_{j-1}$  – тривалість проміжного такту в попередній фазі ( $j-1$ ) світлофорного регулювання, с.

Час, необхідний на рух черги транспортних засобів у кількості, що визначена за (1), можливо розрахувати за наступною формулою, яка отримана шляхом урахування відповідної реакції водіїв на дозвіл на рух, часу на початок руху та часу руху відповідної черги за траєкторією лівого повороту визначеної довжини:

$$(t_{.m})_{i,j} = t_p + t_m + \frac{(L_1)_i + (L_r)_i + (L_2)_i}{(V_{.m})_{i,j}} + \frac{(n_{.m})_{i,j} \cdot \bar{L}_a + ((n_{.m})_{i,l} - 1) \cdot \bar{D}_a}{(V_{.m})_{i,j}}, \quad (2)$$

де  $(t_{.m})_{i,j}$  – час на рух черги транспортних засобів у кількості, що визначена за (1) на  $i$ -тому напрямку у  $j$ -тій фазі світлофорного регулювання, с;

$t_p$  – середній арифметичний час реакції водіїв у черзі транспортних засобів на зміну сигналів світлофора з червоного на зелений, с [5, 6];

$t_m$  – середній час початку руху черги транспортних засобів при зміні сигналів світлофора з червоного на зелений, с [5, 6];

$(L_1)_i$  – довжина прямої ділянки траєкторії лівого повороту від місця зупинки першого транспортного засобу в черзі до початку кривої лівого повороту для  $i$ -го напрямку руху, м;

$(L_r)_i$  – довжина дуги кривої лівого повороту для  $i$ -го напрямку руху, м;

$(L_2)_i$  – довжина прямої ділянки траєкторії лівого повороту від кінця кривої лівого повороту до точки перетину прямої з межею площі перехрестя для  $i$ -го напрямку руху, м;

$(V_{.m})_{i,j}$  – середня швидкість руху на лівому повороті, м/с [1, 3, 4];

$\bar{L}_a$  – середня габаритна довжина транспортних засобів у черзі на виконання лівого повороту, м;

$\bar{D}_a$  – середня дистанція між транспортними засобами при русі черги на лівому повороті, м.

Аналогічно пропонується визначити час руху черги транспортних засобів, що утворилася на зустрічному для лівого повороту напрямку, із метою з'ясування можливості її проїзду

впродовж основного такту. Визначення часу пропонується проводити за наступними формулами:

$$(n_{zn})_{i,j} = (t_u)_j \cdot (N_{zn})_{i,j} = ((t_0)_{j-1} + (t_n)_{j-1}) \cdot (N_{zn})_{i,j}, \quad (3)$$

$$(t_{zn})_{i,j} = t_p + t_m + \frac{(L_{km})_i}{(V_{zn})_{i,j}} + \frac{(n_{zn})_{i,j} \cdot \bar{L}_a + ((n_{zn})_{i,j} - 1) \cdot \bar{D}_a}{(V_{zn})_{i,j}}, \quad (4)$$

де  $(n_{zn})_{i,j}$  – кількість транспортних засобів, що утворили чергу в очікуванні прямого проїзду на зустріч лівому повороту, що досліджується, на  $i$ -тому напрямку у  $j$ -тій фазі світлофорного регулювання, од.;

$(N_{zn})_{i,j}$  – інтенсивність руху транспортних засобів, що будуть виконувати зустрічний рух прямо відносно лівого повороту, що досліджується, на  $i$ -тому напрямку у  $j$ -тій фазі світлофорного регулювання, авт/с;

$(t_{zn})_{i,j}$  – час на рух черги транспортних засобів у кількості, що визначена за (3) на  $i$ -тому напрямку у  $j$ -тій фазі світлофорного регулювання, с;

$(L_{km})_i$  – довжина прямої ділянки зустрічного руху від першого транспортного засобу у черзі до місця пересічення її з траєкторією лівого повороту для  $i$ -го напрямку руху, м.

Обрання способу руху транспортних засобів, при виконанні лівого повороту, необхідно проводити шляхом наступних порівнянь:

$$(t_{zn})_{i,j} \leq (t_o)_j - (t_{zn})_{i,j}, \quad (5)$$

$$(t_{zn})_{i,j} > (t_o)_j - (t_{zn})_{i,j}. \quad (6)$$

У випадку (5) рух транспортних засобів на лівому повороті можливий упродовж основного такту після пропуску черги прямого зустрічного руху, у випадку (6) рух на лівому повороті необхідно додатково організовувати впродовж проміжного такту, а у разі неможливості – виокремлювати відповідну лівоповоротну фазу регулювання.

Пропонується врахувати рух пішоходів на переходах, що конфліктують із відповідним потоком повороту ліворуч. Кількість пішоходів, що утворили чергу в очікуванні зеленого сигналу світлофора на  $i$ -му переході у  $j$ -ій фазі регулювання:

$$(n_{nn})_{i,j} = (t_u)_j \cdot (N_{nn})_{i,j} = ((t_0)_{j-1} + (t_n)_{j-1}) \cdot (N_{nn})_{i,j}, \quad (7)$$

де  $(n_{nn})_{i,j}$  – кількість пішоходів, що утворили чергу в очікуванні зеленого сигналу світлофора, од.;

$(t_u)_j$  – тривалість червоного сигналу, с;

$(N_{nn})_{i,j}$  – інтенсивність руху пішоходів на  $i$ -ому переході, піш/с;

$(t_o)_{j-1}$  – тривалість основного такту в попередній фазі  $(j-1)$  світлофорного регулювання, с;

$(t_n)_{j-1}$  – тривалість проміжного такту в попередній фазі  $(j-1)$  світлофорного регулювання, с.

Час необхідний на рух черги пішоходів у кількості, що визначена за (7), через  $i$ -ий перехід у  $j$ -ій фазі:

$$(t_{nn})_{i,j} = t_{pn} + t_{mn} + \frac{(B_n)_i + (L_{on})_i + (L_n)_i}{(V_{nn})_{i,j}} + \frac{(n_{nn})_{i,j} \cdot (L_n)_i}{(m_{nn})_{i,j} \cdot (V_{nn})_{i,j}}, \quad (8)$$

де  $(t_{nn})_{i,j}$  – час на рух черги пішоходів у кількості, що визначена за (7), через  $i$ -ий перехід у  $j$ -ій фазі, с;

$t_{pn}$  – середній арифметичний час реакції пішоходів на зміну сигналів світлофора з червоного на зелений, с;

$t_{mn}$  – середній час початку руху черги пішоходів, с;

$(B_n)_i$  – довжина  $i$ -го пішохідного переходу, м;

$(L_{on})_i$  – відстань від місця скупчення черги пішоходів до краю проїзної частини для  $i$ -го переходу, м;

$(L_n)_i$  – довжина особистого простору пішохода у прямому напрямку  $i$ -го переходу, м;

$(V_{nn})_{i,j}$  – середня швидкість руху черги пішоходів на  $i$ -му переході, м/с;

$(m_{nn})_{i,j}$  – максимальна кількість пішоходів в один ряд на  $i$ -му пішохідному переході визначеної ширини у  $j$ -ій фазі, с.

З урахуванням (7) та (8) тривалість основного такту  $(t_o)_j$  повинна відповідати:

$$\text{якщо } (t_{nn})_{i,j} \leq (t_{zn})_{i,j}, \quad \text{то } \left[ (t_{zn})_{i,j} + (t_{zn})_{i,j} \right] \leq (t_o)_j; \quad (9)$$

$$\text{якщо } (t_{nn})_{i,j} > (t_{zn})_{i,j}, \quad \text{то } \left[ (t_{nn})_{i,j} + (t_{zn})_{i,j} \right] \leq (t_o)_j. \quad (10)$$

Розроблена методика потребує подальшого дослідження та експериментального обґрунтування з відповідною розробкою рекомендацій щодо її впровадження.

Пропонується в якості об'єкта експериментального дослідження обрати вулично-дорожню мережу міста Горлівка.

Горлівка є одним із найбільших міст Донецької області за кількістю населення та промислових підприємств. Загальна площа міста складає – 422 км<sup>2</sup>, довжина зі сходу на захід складає понад 32,5 км, із півдня на північ – 27,5 км. Дані статистики ДТП, що були отримані в органах Державної автомобільної інспекції міста Горлівка, вказують на наявність на вулично-дорожній мережі місць концентрації ДТП, які співпадають із пересіченнями, де застосоване світлофорне регулювання руху.

Для проведення експериментальних досліджень у межах об'єкта та предмета магістерської роботи пропонується наступний перелік пересічень зі світлофорним регулюванням: Леніна – Безпощадного; Леніна – Комсомольська; Леніна – Гагаріна; Пушкінська

Комсомольська; Пушкінська – Гагаріна; Мініна і Пожарського – Комсомольська.

Указані пересічення були проаналізовані щодо наявної кількості ДТП за наступними видами згідно з нумерацією Державної автомобільної інспекції України: 1 – зіткнення; 3 – наїзд на транспортний засіб, що стоїть.

Результати розрахунку сумарного часу руху лівоповоротних із зустрічними транспортними засобами з урахуванням пішоходів за фазами регулювання наведені в таблиці 1.

За результатами розрахунків побудовано графічні залежності, що розкривають відповідність теоретичних розрахункових даних експериментальним, які були безпосередньо виміряні. Графічні залежності вказані на рисунках 1, 2. Розрахунки лінійного коефіцієнта кореляції вказали на наявність значень 0,879, що для 5 ступенів свободи є більшим ніж нормативне [7, 8], тобто гіпотезу щодо адекватності теоретичних положень підтверджено.

Таблиця 1 – Результати розрахунку сумарного часу руху лівоповоротних із зустрічними транспортними засобами з урахуванням пішоходів за фазами регулювання на пересіченнях, що прийняті об'єктом експериментальних досліджень

№ з/п	Найменування пересічення	Наявні тривалості руху, с			Розрахункові тривалості руху, с		
		Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1	Леніна – Безпощадного	9,0	9,5	–	11,5	10,1	–
2	Леніна – Комсомольська	13,0	11,5	–	12,2	10,0	–
3	Леніна – Гагаріна	13,0	7,0	15	12,1	6,1	13,2
4	Пушкінська – Комсомольська	10,0	9,0	–	12,2	8,1	–
5	Пушкінська – Гагаріна	10,8	8,7	–	12,1	10,1	–
6	Мініна і Пожарського – Комсомольська	14,0	5,4	–	15,0	6,0	–

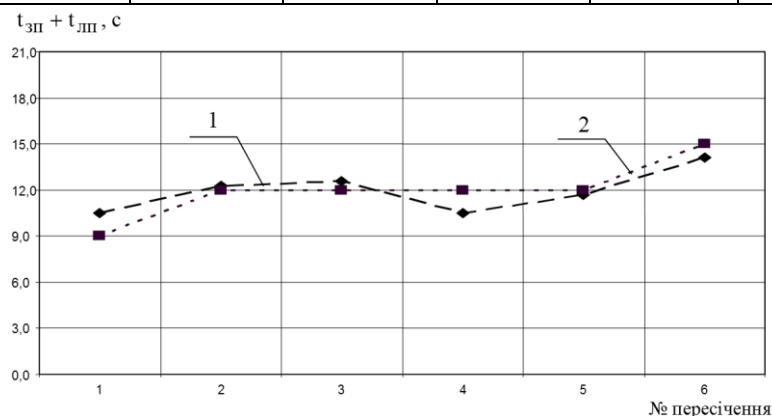


Рисунок 1 – Розрахункові за запропонованою методикою (1) та виміряні експериментально (2) сумарні значення часів лівоповоротного із зустрічним рухом, що усереднені для першої фази світлофорного регулювання пересічень на вулично-дорожній мережі міста Горлівка

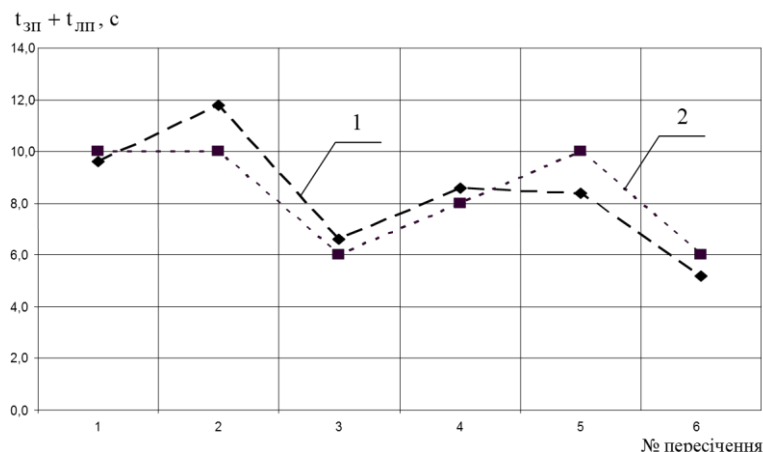


Рисунок 2 – Розрахункові за запропонованою методикою (1) та виміряні експериментально (2) сумарні значення часів лівоповоротного із зустрічним рухом, що усереднені для другої фази світлофорного регулювання пересічень на вулично-дорожній мережі міста Горлівка

### Висновки

Розроблено методику врахування кінематичних характеристик лівоповоротного із зустрічним рухом у світлофорному регулюванні, яка дозволяє проводити організацію основних та відповідних проміжних тактів світлофорного регулювання з урахуванням можливості проїзду лівоповоротних із зустрічними потоками та відповідного пропуску пішохідних потоків, що рухаються в конфліктних напрямках до повороту ліворуч.

Теоретичні положення були експериментально підтверджені шляхом порівняння часів виконання відповідних маневрів для забезпечення безпечного повороту ліворуч із значеннями часу реальних маневрів.

### **Список літератури**

1. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 255 с.  
Kremenets Yu. A. Tekhnicheskiye sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya (Technical Facilities for Traffic Management) / Yu. A. Kremenets, M. P. Pecherskiy, M. B. Afanasyev. – М.: IKTS "Akademkniga", 2005. – 255 s.
2. Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія / Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут; за заг. ред. А. М. Редзюка. – К.: ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2005. – 400 с.  
Avtomobilnyi transport Ukrainy: stan, problemy, perspektyvy rozvytku: monohrafiya (Automobile Transport of Ukraine: State, Problems, Prospectives of Development: Monography) / Derzhavnyi avtotransportnyi naukovodoslidnyi i proektnyi instytut; za zah. red. A. M. Redziuka. – К.: DP «DerzhavtotransNDIproekt», 2005. – 400 s.
3. Справочник по безопасности дорожного движения, обзор мероприятий по безопасности дорожного движения / под ред. В. В. Сильянова. – ОСЛО-МОСКВА-ХЕЛЬСИНКИ, 2001. – 576 с.  
Spravochnik po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya, obzor meropriyatiy po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya (Reference Book on Traffic Safety, Traffic Safety Measures Review) / pod red. V. V. Silyanova. – OSLO-MOSCOW-HELSINKI, 2001. – 576 s.
4. Системологія на транспорті: підручник: у 5 кн. / за заг. ред. М. Ф. Дмитриченко. – К.: Знання України, 2005. – Кн. IV: Організація дорожнього руху / Е. В. Гаврилов, М. Ф. Дмитриченко, В. К. Доля та ін. – 452 с.  
Systemolohiya na transporti: u 5 kn. (Systematology in Transport: in 5 Books) / za zah. red. M. F. Dmytrychenka. – К.: Znannia Ukrainy, 2005. – Кн. IV: Orhanizatsiya dorozhnoho rukhu (Book IV: Traffic Management) / Ye. V. Havrylov, M. F. Dmytrychenko, V. K. Dolia ta in. – 452 s.
5. Иларионов В. А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий / В. А. Иларионов. – М.: Транспорт, 1989. – 255 с.  
Ilarionov V. A. Ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy (Road Transport Accidents Review) / V. A. Ilarionov. – М.: Transport, 1989. – 255.
6. Домке Э. Р. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий / Э. Р. Домке. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 288 с.  
Domke E. R. Rassledovaniye i ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy (Road Transport Accidents Investigation and Review) / E. R. Domke. – М.: Izdatelskiy tsentr "Akademiya", 2009. – 288 s.
7. Горкавий В. К. Математична статистика: навчальний посібник / В. К. Горкавий, В. В. Ярова. – К.: ВД «Професіонал», 2004. – 384 с.  
Horkavyy V. K. Matematychna statystyka: navchalnyi posibnyk (Mathematical Statistics: Textbook) / V. K. Horkavyy, V. V. Yarova. – К.: VD "Profesional", 2004. – 384 s.
8. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.  
Kobzar A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov (Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Scientists) / A. I. Kobzar. – М.: FIZMATLIT, 2006. – 816 s.

Рецензент: канд. екон. наук, доц. Т. Є. Василенко, АДІ ДонНТУ  
Стаття надійшла до редакції: 20.11.2013