

DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.329-339

УДК 656.1

к.т.н. **Осипов В.О.**,
Osipov.valentin100@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9284-7919,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНІ ПРОЦЕСИ, ЯК МАТЕМАТИЧНА ОСНОВА НАДІЙНОСТІ ПОВЕДІНКИ ПІДСИСТЕМ СИСТЕМИ «ВОДІЙ- АВТОМОБІЛЬ-ДОРОГА-СЕРЕДОВИЩЕ»

Робота присвячена вивченню питання надійності поведінки підсистем системи водій-автомобіль-дорога-навколишнє середовище.

Ключові слова: надійнісна модель; статистичне імітаційне моделювання; процес деградації.

Постановка проблеми. За визначенням низки дослідників, безпека дорожнього руху - це комплекс та система правил, заходів і засобів, що забезпечують умови безпечного дорожнього руху, які спрямовані на захист і збереження життя і здоров'я активним та пасивним учасникам дорожнього руху, а також захист і збереження довкілля та майна [1-7]. Тому гостро стає питання вивчення всіх аспектів роботи системи «Водій-автомобіль-дорога-середовище» (В-А-Д-С) [8-9].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При написанні роботи вивчались дослідження вітчизняних та закордонних авторів з питань основ надійності та оцінювання ризиків.

Метою публікації є вивчення підходів до забезпечення надійності складних систем.

Основна частина. Основною характеристикою системи В-А-Д-С є її надійність. Взагалі надійність об'єкта - властивість виконувати задані функції, зберігаючи у часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах, що відповідають заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонту. Надійність - складна властивість, що складається з більш простих (безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності, збереженості). Змістовне значення кожного зі згаданих термінів прописано у відповідних нормативних документах. В залежності від виду об'єкта, його надійність може визначатись всіма чи частиною перерахованих властивостей. Для об'єкта В-А-Д-С надійність залежить, насамперед, від безвідмовності. Безвідмовність - властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу [10].

Система В-А-Д-С безумовно належить до класу складних технічних систем, яким притаманні такі властивості:

- наявність в їх структурі великої кількості підсистем, які взаємодіють згідно із заданим алгоритмом у процесі функціонування системи, що спричиняє велику розмірність математичної моделі надійності системи;

- підсистемам системи можуть бути властиві не один, а декілька видів відмов (наприклад, екстрене гальмування через перешкоду, втрата свідомості водієм);

- у випадках багатофункціональних систем можливі ситуації, коли не всі функції виконуються у повному обсязі чи виконуються неодноразово, або виконуються з погіршенням відповідних характеристик, що ускладнює визначення поняття “відмова системи”;

- складні системи відповідального призначення мають властивість відмовостійкості, тобто здатні нормально функціонувати в умовах відмов окремих підсистем. Ця властивість досягається введенням різного роду надлишковості (структурної, алгоритмічної, часової тощо), що призводить до ускладнення алгоритму внутрішньої поведінки системи внаслідок введення функцій контролю, локалізації несправностей, комутації та відновлення працездатності системи, що в результаті істотно ускладнює модель надійності системи. Перелічені властивості повинні відображати моделі надійності, і цю обставину треба враховувати, вибираючи метод моделювання надійної поведінки складних систем.

Загальний підхід до формування надійних моделей системи В-А-Д-С полягає у тому, що цю модель у формалізованому вигляді описують з позиції надійності взаємодії підсистем у процесі функціонування і відображають ступінь впливу надійності окремих підсистем на надійність системи загалом. Зазвичай показники надійності елементів системи (інтенсивності відмов) визначають на підставі законів розподілу часу безвідмовної роботи, причому поняття “відмова” чітко визначають для кожної підсистеми. Для відновлюваних елементів, крім інтенсивності відмов, визначають також інтенсивність відновлень. Ці показники прийнято вважати незалежними самостійними даними. Моделі надійності, сформовані в термінах відмов елементів, є основним видом надійних моделей систем. Із цього випливає, що сукупність комбінацій можливих станів елементів визначає множину можливих станів системи загалом, яка називається простір станів системи (теорія керування).

Формування надійних моделей складних відмовостійких систем у загальному випадку здійснюють за таких припущень:

- перехід будь-якого елемента із одного стану в інший відбувається миттєво внаслідок відмови чи відновлення, що одночасно спричиняє зміну стану усієї системи;
- розподіли часу безвідмовної роботи та часу відновлення підсистем відомі;
- у разі відмови робочого елемента він миттєво замінюється резервним, якщо резервних елементів декілька, порядок заміни відомий;
- контроль стану підсистем є неперервним і відмова будь-якого елемента системи виявляється одразу ж;
- реакція водія починається або негайно після відмови, або згідно з пріоритетністю, яку виставляє водій спираючись на отриману інформацію;
- результатом відновлення елементів є повне відновлення їх працездатності.

Отже, із перелічених вище припущень випливає, що будь-який елемент системи може перебувати в одному з таких станів:

- працездатності (нормального функціонування);
- відновлення;
- простою внаслідок припинення функціонування, спричиненого відмовою (відновленням) іншого елемента, або своєю чергою, кожен стан системи у відповідний момент часу характеризується вектором станів усіх елементів у той самий момент.

Всю множину станів системи поділяють на дві підмножини: стани працездатності та стани непрацездатності (або часткової непрацездатності). Система переходить з одного стану в інший миттєво внаслідок відмови чи відновлення одного із елементів. Сформована в такий спосіб модель описує надійну поведінку системи загалом як траєкторію у просторі станів працездатності та непрацездатності.

Можливі два підходи до забезпечення надійності складних систем:

- на підставі статистичного імітаційного моделювання;
- на підставі аналітичного моделювання.

Аналітичні методи є найпоширенішими під час моделювання та розрахунку показників надійності складних технічних систем [11].

Серед численних відомих аналітичних методів відзначимо:

- логіко-ймовірнісні методи, які ґрунтуються на припущенні, що кожен елемент системи може перебувати у одному із двох можливих станів: працездатності та відмови (непрацездатності);
- топологічні методи, які уможливають визначення показників надійності систем на підставі графу станів, який є одним зі способів опису процесу функціонування системи з погляду надійності;

- методи на основі марківських випадкових процесів, які застосовують для моделювання надійної поведінки технічних систем як засіб математичного опису еволюції системи з точки зору надійності [12].

Складність технічних систем зумовлює великі розмірності їхніх математичних моделей, що практично унеможлиблює їх формування та аналіз ручними способами. Необхідне поєднання аналітичних методів дослідження надійності з обчислювальними можливостями програмних продуктів. Вибір моделей надійності здійснюють на основі аналізу фізики процесів, що призводять до відмов, досвіду експлуатації, законів розподілу наробітку виробів до відмови аналогів. У ряді випадків наявні визначені залежності між механізмами відмов і видами функцій розподілу, які дозволяють зробити їх обґрунтований вибір. При цьому важливо апроксимувати характеристики надійності відомими теоретичними функціями розподілу.

В табл. 1 наведені головні закони розподілу часу безвідмовної роботи, що застосовуються як моделі надійності виробів, та їхні характеристики. Як додаткову інформацію використовують відомості про характер зміни $R_i(t)$, $f_i(t)$, і $\lambda_i(t)$, які визначають за формулами:

$$R(t) = \frac{N(t)}{N_0}; \lambda_i(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}; R(t) = \frac{N(t)}{N_0}; \quad (1)$$

де Δn_i - кількість відмов у i -му інтервалі;

N_0 - загальна кількість виробів;

Δt - інтервал наробітку;

$N(t)$ - кількість працездатних виробів до моменту часу t .

На ранніх стадіях життєвого циклу технічних виробів потрібна модель прогнозування надійності, оскільки немає відомостей про відмови. Моделі такого типу призначені для передбачення кількості помилок і зараховані до імовірнісних моделей надійності.

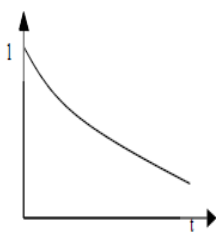
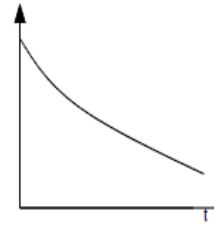
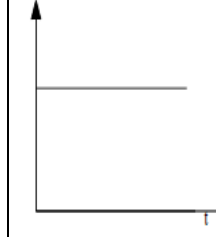
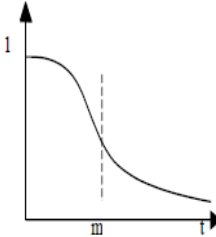
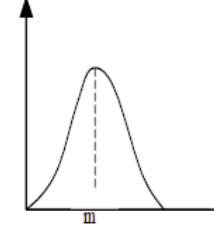
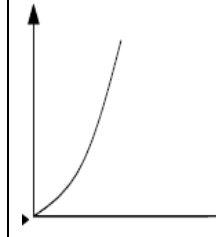
Модель зростання надійності потрібна для оцінки поточного рівня надійності, часу і ресурсів, необхідних для досягнення заданого рівня надійності. Моделі такого типу належать до імовірнісно-фізичних моделей надійності технічних об'єктів. Незалежно від складності об'єкт (елемент, система, складна система з резервуванням) має певну функцію розподілу наробітку (модель відмов), і вся проблема оцінки показників надійності об'єкта зводиться до оцінки параметрів цього розподілу.

Імовірнісно-фізичні моделі (DM-, DN- і α - розподіл) спеціально побудовані для опису відмов об'єктів на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які зумовлюють відмови. На відміну від імовірнісних моделей вони

є фізично обґрунтованими моделями, які враховують фізичну природу відмов та дозволяють для оцінки надійності використовувати характеристики фізичних явищ, які формують відмови об'єктів.

Таблиця 1.

Закони розподілу та їхні характеристики

Закон розподілу	Характеристики			Застосування розподілу
	$P(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$	
1	2	3	4	5
<p>Експоненційний</p> $P(t) = e^{-\lambda t}$ $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ $\lambda(t) = const$				<p>При аналізі складних систем, які пройшли період пристосування; раптових відмовах, що виникли внаслідок дефектів технології, в теорії масового обслуговування. Цьому закону підпорядкований наробіток між послідовними відмовами, в режимі який встановлений</p>
<p>Нормальний:</p> $P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt$ $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}$ $\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t-m}{\sigma}\right) \right)$				<p>При відмовах внаслідок зношення та старіння елементів. При відмовах внаслідок впливу великої кількості факторів, рівнозначних за величиною</p>

1	2	3	4	5
<p>Вейбулла:</p> $P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^\beta}$ $f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^\beta}$ $\lambda(t) = \frac{b}{a} t^{b-1}$				<p>При описі термінів служби елементів доріг, характеристики міцності, втомлісної стійкості авто., а також рівня навичок водія</p>
<p>Гамма-розподіл:</p> $P(t) = \int_0^t \frac{\alpha^\beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t}}{\Gamma(\beta)}$ $f(t) = \frac{\alpha^\beta}{\Gamma(\beta)} e^{-\alpha t} t^{\beta-1}$ $\lambda(t) = \frac{t^{\beta-1} e^{\alpha t}}{\int_t^\infty t^{\beta-1} e^{-\alpha t} dt}$				<p>При описі наробітку до відмови внаслідок зношення чи накопичення пошкоджень, наробітку системи з резервними одиницями, часу відновлення ($\Gamma(\beta)$-гама функція)</p>

Типові моделі випадкових фізичних процесів деградації наведені на рис. 1, де показано реалізації визначальних параметрів для сукупності однотипних об'єктів. Наведені моделі відповідають широкому класу фізичних процесів деградації (втоми, зношування, корозії, старіння тощо). Усі зовнішні чинники, які визначають надійність та пов'язані з конструкцією, властивостями використовуваних матеріалів, технологією виготовлення, рівнем виробництва й експлуатації, у кінцевому підсумку впливають на нахил (середню швидкість процесів деградації) і розсіяння реалізацій, не змінюючи схеми формалізації і типу розподілу. Тип розподілу у схемі формалізації, що розглядається, визначається характером фізичного процесу деградації. Зокрема, детермінованим, монотонним чи немонотонним видом його реалізацій.

Параметри α -розподілу мають таку інтерпретацію:

- параметр масштабу β дорівнює величині, зворотній середній швидкості змінювання визначального параметра;
- параметр форми α дорівнює зворотній величині коефіцієнта варіації швидкості змінювання визначального параметра.

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим віяловим процесом типу (Рис. 1, модель *a*), то у такому випадку розподіл відмов буде апроксимуватися α -розподілом (табл. 2).

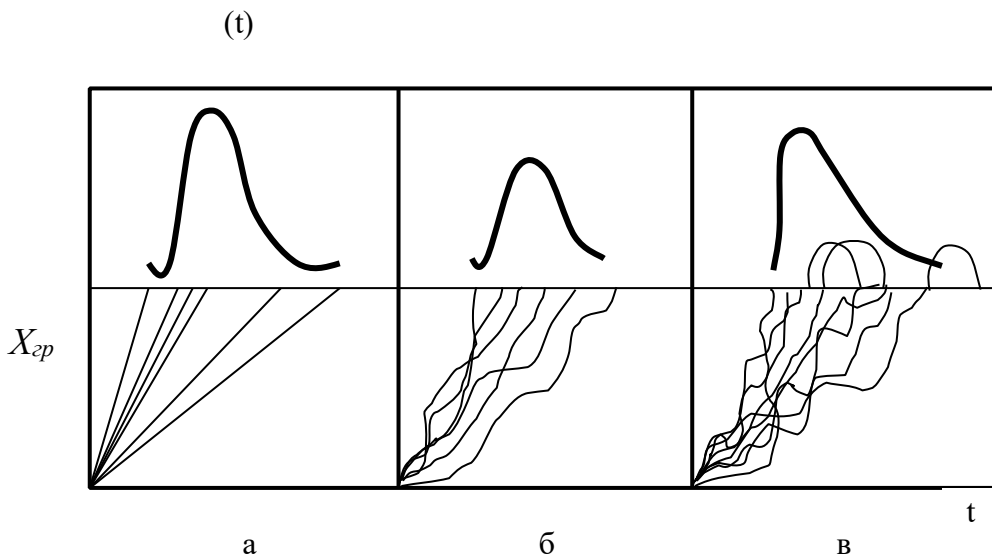


Рис. 1. Моделі випадкових процесів деградації і схем формування розподілу наробітку до відмови:

a - віяловий процес (α -розподіл); *б* - марковський монотонний процес (DM-розподіл);
в - марковський немонотонний процес (DN-розподіл)

Таблиця 2.

Основні характеристики α - розподілу

Характеристика α -розподілу	Розрахункова формула
Щільність імовірності	$P(t) = \int_{0t}^t \frac{\alpha^b t^{b-1} e^{-\alpha t}}{\Gamma(b)}$ $f(t) = \frac{\alpha^b}{\Gamma(b)} e^{-\alpha t} t^{b-1}$ $\lambda(t) = \frac{t^{b-1} e^{\alpha t}}{\int_t^{\infty} t^{b-1} e^{-\alpha t} dt}$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = \Phi\left(\frac{\alpha t - \beta}{t}\right)$
Модель надійності (ймовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi\left(\frac{\beta - \alpha t}{t}\right)$

Характеристики процесу деградації повністю визначаються початковим станом і не залежать від механо-фізико-хімічних та інших процесів деградації, які відбуваються в об'єктах під впливом зовнішніх умов та часу.

Обидві моделі подаються однорідним марковським процесом дифузійного типу. Визначення розподілу напрацювання до першої відмови об'єктів у такому випадку зводиться до вирішення завдання першого досягнення процесом межі ділянки (граничного рівня). Параметри двопараметричних дифузійних розподілів мають фізичну інтерпретацію:

- параметр масштабу μ дорівнює величині, зворотній середній швидкості змінювання визначального параметра (нормованого на граничне значення);
- параметр форми ν дорівнює коефіцієнту варіації швидкості змінювання визначального параметра.

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з монотонними реалізаціями, то розподіл відмов буде апроксимуватися дифузійним монотонним розподілом (DM-розподіл) (табл. 3). Незворотний характер мають процеси руйнування у разі втоми, механічного зношення, корозії та старіння, тобто процеси, притаманні механічним об'єктам (автомобіль, дорога).

Таблиця 3.

Основні характеристики DM-розподілу

Характеристика DM-розподілу	Розрахункова формула
Щільність ймовірності	$f(t) = \frac{(t + \mu)}{2\nu t \sqrt{2\pi\mu t}} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right)$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DM(t; \mu; \nu) \left(\frac{t - \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right)$
Модель надійності (ймовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu \sqrt{\mu t}}\right)$

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з немонотонними реалізаціями, чи у загальному випадку з монотонними і немонотонними реалізаціями, то розподіл відмов буде апроксимуватися дифузійним немонотонним розподілом (DN-поділ, табл. 4).

Таблиця 4.

Основні характеристики DN-розподілу

Характеристика DN-розподілу	Розрахункова формула
Щільність ймовірності	$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{\nu t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DN(t; \mu; \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right) + e^{2\nu-2} \Phi\left(\frac{t + \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right)$
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu \sqrt{\mu t}}\right) - e^{2\nu-2} \Phi\left(\frac{\mu + t}{\nu \sqrt{\mu t}}\right)$

Висновки. Таким чином, процеси деградації підсистем поряд з монотонними реалізаціями (скупчення дислокацій, пластичні деформації, механічне руйнування через втому) внаслідок низки явищ мають і немонотонні реалізації. Тому у загальному випадку прийнято розглядати деградацію підсистем як процес з немонотонними реалізаціями. Якщо встановлено, що відмови зумовлені незворотними процесами типу механічне зношення, втома, то за теоретичну модель відмов слід прийняти DM-розподіл. Для всіх механічних елементів (деталей автомобілів, елементів доріг) найбільш придатною моделлю відмов є DM-розподіл, при цьому оцінка коефіцієнта варіації може бути в інтервалі від 0,3 до 0,7 [13].

Список джерел.

1. Ю.С. Шемшученко. Безпека дорожнього руху // Юридична енциклопедія : [у 6 т.] / ред. кол.: Ю.С. Шемшученко (відп. ред.) [та ін.]. - К. : Українська енциклопедія ім. М.П. Бажана, 1998. - Т. 1 : А-Г. - 672 с. - ISBN 966-7492-00-X.].
2. McMahon, K & Dahdah, S. (2008). The True Cost of Road Crashes: Valuing life and the cost of serious injury. iRAP: Hamshire, UK;]
3. Статистика аварійності в Україні. – Електронний ресурс. Режим доступу: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/>.
4. Section 402: State Highway Safety Programs. - U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration/ - Електронний ресурс. Режим доступу: <https://highways.dot.gov/>.
5. National Road Safety Strategy 2021-30. - Infrastructure and transport ministers, Commonwealth of Australia 2021. December 2021 /. - 32 p. ISBN 978-1-922521-09-1.
6. EU Road Safety: Towards “Vision Zero”. - European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA) © European Union, 2022. 38 p. ISBN 978-92-9208-142-3 doi: 10.2840/853053.
7. Ben Hamilton-Baillie (2 February 2008). "Hans Monderman". Obituaries. The Guardian. Retrieved 5 February, 2008.
8. Линник І.Е. Теоретичні основи прогнозування еволюції ергономічної системи «Водій - транспортний засіб - транспортна мережа - середовище»/ І.Е. Линник // Харків: Національна академія міського господарства, 2013. - 41 с.
9. Шпачук В.П. Модель функціонування системи «Людина - автомобіль - дорога - приземний простір» у замкнутому стані / В.П. Шпачук, І.Е. Линник // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. № 4. - Донецьк, 2009. - С. 31-35.
10. Безпека дорожнього руху: навчальний посібник / А.А. Кашканов, О.Г. Грисюк, І.І. Гуменюк. - Вінниця: ВНТУ, 2017. - 90 с.
11. Хенлі Е.Дж. Надійнісне проектування технічних систем і оцінка ризику / Е.Дж. Хенлі, Х. Кумамото: пер. з англ. за ред. Ю.Г. Зареніна. - К.: Вища школа, гол. вид-во, 1987. - 544 с.
12. За ред. проф. Ю.Я. Бобала, проф. Б.А. Мандзія. Математичні моделі та методи аналізу електронних кіл . - Навчальний посібник. - 2013. - 320 с. ISBN 978-617-607-355-0
13. Бурлаков В.І., Ленков С.В., Салімов Р.М. Основи надійності повітряних суден та авіаційних двигунів. Київ : НАУ, 2004. 172 с.

Osypov Valentyn

Kyiv National University of Construction and Architecture

**DISCRETE-CONTINUOUS PROCESSES AS THE MATHEMATICAL BASIS
OF THE RELIABILITY OF THE BEHAVIOR OF SUBSYSTEMS OF THE
"DRIVER-VEHICLE-ROAD-ENVIRONMENT" SYSTEM**

The work is devoted to the study of the reliability of the behavior of subsystems of the driver-car-road-environment system. According to the definition of a number of researchers, traffic safety is a complex and system of rules, measures and means that ensure safe traffic conditions, which are aimed at protecting and preserving the life and health of active and passive road users, as well as protecting and preserving the environment and property. Therefore, the question of studying all aspects of the operation of the "Driver-car-road-environment" system becomes acute. The general approach to the formation of reliability models of the B-A-D-S system consists in the fact that this model is described in a formalized form from the standpoint of the reliability of the interaction of subsystems in the process of functioning and reflects the degree of influence of the reliability of individual subsystems on the reliability of the system as a whole. Usually, reliability indicators of system elements (failure intensity) are determined on the basis of the laws of distribution of time of failure-free operation, and the concept of "failure" is clearly defined for each subsystem. Reliability models formed in terms of element failures are the main type of system reliability models. It follows that the set of combinations of possible states of elements determines the set of possible states of the system in general, which is called the space of system states (control theory).

When writing the work, the research of domestic and foreign authors on the issues of the basics of reliability and risk assessment was studied. The purpose of the publication is to study approaches to ensuring the reliability of complex systems. It was determined that for all mechanical elements (car parts, road elements) the most suitable failure model is the DM-distribution, while the estimation of the coefficient of variation can be in the range from 0.3 to 0.7

Key words: reliability model; statistical simulation modeling; degradation process.

REFERENCES

1. Yu.S. Shemshuchenko. Traffic safety // Legal encyclopedia: [in 6 volumes] / editor. col.: Yu.S. Shemshuchenko (rep. editor) [etc.]. - K.: Ukrainian encyclopedia named after M.P. Bazhana, 1998. - T. 1: A-G. - 672 p. - ISBN 966-7492-00-X.} {in Ukrainian}

2. McMahon, K & Dahdah, S. (2008). The True Cost of Road Crashes: Valuing life and the cost of serious injury. iRAP: Hamshire, UK;] {in English}
3. Accident statistics in Ukraine. - Electronic resource. Access mode: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/>. {in Ukrainian}
4. Section 402: State Highway Safety Programs. - U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration/ - Електронний ресурс. Режим доступу: <https://highways.dot.gov/>. {in English}
5. National Road Safety Strategy 2021-30. - Infrastructure and transport ministers, Commonwealth of Australia 2021. December 2021 /. - 32 p. ISBN 978-1-922521-09-1. {in Ukrainian}
6. EU Road Safety: Towards "Vision Zero". - European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA) © European Union, 2022. 38 p. ISBN 978-92-9208-142-3 doi: 10.2840/853053. {in English}
7. Ben Hamilton-Baillie (2 February 2008). "Hans Monderman". Obituaries. The Guardian. Retrieved 5 February, 2008. {in English}
8. Lynnyk I.E. Teoretychni osnovy prohnovuvannya evolyutsiyi erhonomichnoyi systemy «Vodiy - transportnyy zasib - transportna merezha - seredovyshe»/ I.E. Lynnyk // Kharkiv: Natsional'na akademiya mis'koho hospodarstva, 2013. - 41 s. {in Ukrainian}
9. Shpachuk V.P. Model' funktsionuvannya systemy «Lyudyna - avtomobil' - doroha - pryzemnyy prostir» u zamknutomu stani / V.P. Shpachuk, I.E. Lynnyk // Visnyk Donets'koho instytutu avtomobil'noho transportu. № 4. - Donets'k, 2009. - S. 31-35. {in Ukrainian}
10. Bezpeka dorozhn'oho rukhu: navchal'nyy posibnyk / A.A. Kashkanov, O.H. Hrysyuk, I.I. Humenyuk. - Vinnytsya : VNTU, 2017. - 90 s. {in Ukrainian}
11. Khenli E.Dzh. Nadiynisne proektuvannya tekhnichnykh system i otsinka ryzyku / E.Dzh. Khenli, KH. Kumamoto: per. z anhl. za red. YU.H. Zarenina. - K.: Vyscha shkola, hol. vyd-vo, 1987. - 544 s. {in Ukrainian}
12. According to the ed. Prof. Yu. Ya. Bobala, prof. B. A. Mandzia. Mathematical models and methods of analysis of electronic circuits. - Tutorial. - 2013. - 320 p. ISBN 978-617-607-355-0. {in English}
13. Burlakov V.I., Lenkov S.V., Salimov R.M. Basics of reliability of aircraft and aircraft engines. Kyiv: NAU, 2004. 172 p. {in Ukrainian}