

УДК 621.436

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-9

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ СИСТЕМИ  
«COMMON RAIL» ДИВИГУНІВ СЕРІЇ «ЯМЗ-5340»**

**Борисюк Дмитро Вікторович**, к.т.н., старший викладач  
Вінницький національний технічний університет  
**Твердохліб Ігор Вікторович**, к.т.н., доцент  
**Купчук Ігор Миколайович**, к.т.н., доцент  
**Цуркан Олександр Васильович**, магістрант  
Вінницький національний аграрний університет

**Dmytro Borysiuk**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer  
Vinnitsia National Technical University  
**Igor Tverdokhlib**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
**Ihor Kupchuk**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
**Oleksandr Tsurkan**, Master's Student  
Vinnitsia National Agrarian University

*Відмови систем та механізмів двигуна внутрішнього згорання стоять в ряду перших із загального числа відмов тракторів та автомобілів. Для їх визначення використовується значна кількість методів і засобів визначення технічного стану (діагностування). Функціонально-вартісний аналіз є евристичним методом, спрямованим на виявлення можливостей зниження вартості та підвищення якості об'єкта, що розглядається як система з орієнтацією на функціональний підхід на всіх етапах його життєвого циклу.*

*У цій науковій статті викладено функціонально-вартісний аналіз антиблокувальної гальмівної системи автомобілів. Була розроблена функціональна модель цієї системи та проведена класифікація її функцій.*

*Подано також класифікацію функцій функціональної моделі антиблокувальної гальмівної системи автомобілів. Дійсно визначено коефіцієнти корисності даної системи шляхом побудови матриці переваг відповідно до відомої методики.*

*Узагальнюючий критерій витрат у проектуванні технічних та виробничих систем враховує витрати на всіх етапах життєвого циклу системи. Для оцінки цих витрат була створена матриця антиблокувальної гальмівної системи автомобілів, з якою розраховуються коефіцієнти витрат.*

*Побудовані діаграми корисності функцій, розташування функцій, функціонально-вартісні та витратні діаграми дозволили використовувати функції антиблокувальної гальмівної системи автомобілів, які мають позитивний функціонально-вартісний показник та найвищий рейтинг серед представлених функцій. Така операція або функції, що відзначаються найвищим функціонально-вартісним показником та рангом, є ключовими для подальшого розвитку системи або досягнення мети аналізу.*

**Ключові слова:** функціонально-вартісний аналіз, система ABS, функціональна модель, класифікація функцій, коефіцієнт корисності, матриця пріоритетів, коефіцієнт витрат, діаграма корисності функцій, діаграма розташування функцій, функціонально-вартісна діаграма, діаграма витрат функцій.

**Ф. 10. Рис. 4. Табл. 1. Літ. 22.**

---

### **1. Постановка проблеми**

Методи визначення технічного стану автотракторних дизельних двигунів, як правило, вимагають часткового розбирання, а будь-яка розбирально-складальна операція, навіть якщо деталь не ремонтується, знижує термін служби вузла до 10-25%. Тому для визначення технічного стану деталей та вузлів автотракторних двигунів необхідно використовувати сучасні методи діагностування, які засновані на аналізі вихідних параметрів, функціонально пов'язаних зі структурними параметрами [1 - 4].

---

### **2. Аналіз останніх досліджень та публікацій**

На сьогодні діагностування автотракторних дизельних двигунів виконується декількома методами із застосуванням різного устаткування. Значний внесок у розробку методів і засобів

діагностування дизельних автотракторних двигунів внесли: Канарчук В.Є. [1], Курніков І.П. [2], Лудченко О.А. [3], Кукурудзяк Ю.Ю. [5] та ін. Методи діагностування автотракторних дизельних двигунів, що отримали поширення, застосовуються при їх частковому розбиранні.

Застосування сучасних методів діагностування, заснованих на аналізі вихідних параметрів дизельного двигуна, функціонально пов'язаних з його структурними параметрами, дозволить вирішити завдання зниження трудомісткості робіт, якості процесу діагностування, однак, вони досліджені недостатньо.

Питанням проектування систем технічного діагностування присвячені наукові роботи Чабанного В.Я. [6], Коваленка В.М. [7], Яцковського В.І. [8], Анісімова В.Ф. [9] та ін.

Аналіз літературних і наукових джерел виявив, що усі методи, способи та засоби діагностування двигунів внутрішнього згорання тракторів та автомобілів, не в повній мірі відповідають вимогам щодо визначення їх поточного технічного стану, що вимагає розробки та дослідження спеціальних математичних моделей автоматизації процесу діагностування їх основних частин. Отже, процес визначення технічного стану системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» та його автоматизація є актуальним науково-технічним завданням.

### 3. Мета досліджень

Надійність тракторів та автомобілів залежить від надійності його вузлів та агрегатів, і одним з таких агрегатів являється двигун внутрішнього згорання.

Метою дослідження – підтримка надійності функціонування системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» за рахунок створення математичної моделі автоматизації процесу діагностування.

### 4. Виклад основного матеріалу

Двигуни, що виробляє публічне акціонерне товариство «Автодизель» (Ярославський моторний завод) – це двигуни багатоцільового призначення та застосування. Технічні характеристики, універсальність, висока ступінь уніфікації і ремонтпридатність сприяють їх широкому використанню на тракторах, сільськогосподарській і військовій техніках, та автомобілях [10].

Широкого поширення серед двигунів публічного акціонерного товариства «Автодизель» (ЯМЗ) набула серія дизелів ЯМЗ-5340. Двигун ЯМЗ-5340 (Рис. 1, а) екологічного класу «Євро-4» являє собою базову чотири-циліндрову модель рядного чотиритактного двигуна з турбонадувом.

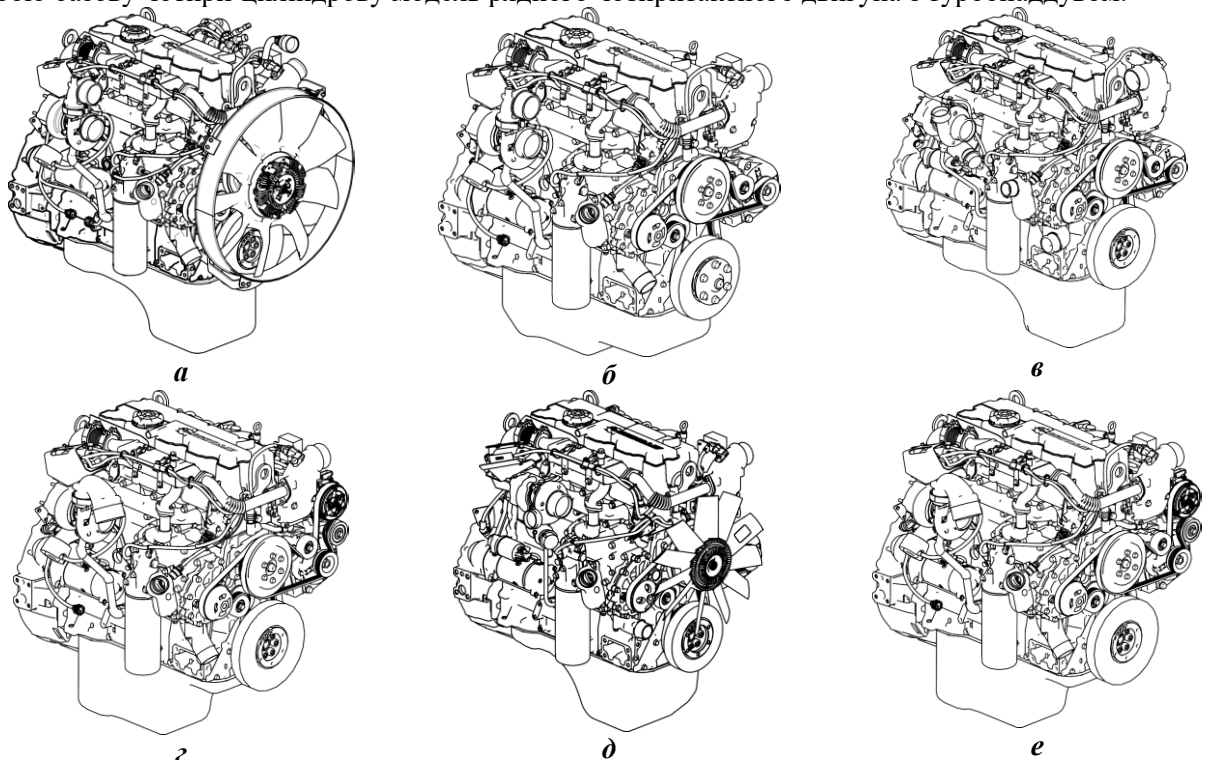


Рис. 1. Серія дизелів ЯМЗ-5340 [10]:  
а – ЯМЗ-5340 (базова модель); б – ЯМЗ-5341-10; в – ЯМЗ-5344;  
г – ЯМЗ-53402; д – ЯМЗ-53441-20; е – ЯМЗ-53423



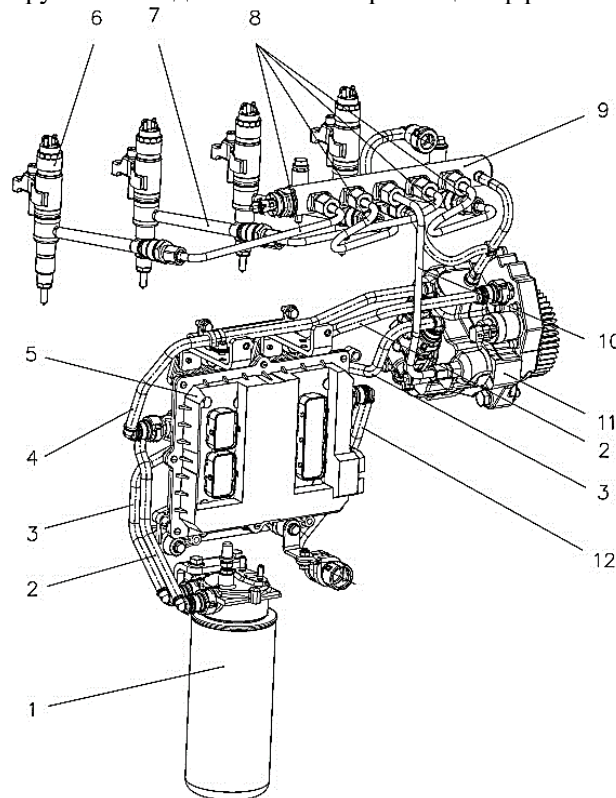
Двигуни ЯМЗ-5341, ЯМЗ-5341-10 (Рис. 1, б), ЯМЗ-5342, ЯМЗ-5344 (Рис. 1, в), ЯМЗ-5344-10 та їх комплектації екологічного класу «Євро-4» є модифікаціями двигуна ЯМЗ-5340, конструктивно виконані аналогічно базовій моделі, відрізняються регулюваннями параметрів налаштування електронного блоку управління.

Двигуни ЯМЗ-53402 (Рис. 1, г), ЯМЗ-53422, ЯМЗ-53442 та їх комплектації екологічного класу «Євро-4» конструктивно виконані аналогічно базовій моделі, що відрізняються регулюваннями паливної апаратури за рахунок зміни параметрів налаштування електронного блоку управління, не комплектуються системою рециркуляції відпрацьованих газів (EGR).

Двигуни ЯМЗ-53411, ЯМЗ-53421, ЯМЗ-53431, ЯМЗ-53441-20 (Рис. 1, д), ЯМЗ-5346 та їх комплектації екологічного класу Євро-4 конструктивно виконані аналогічно базовій моделі, відрізняються регулюваннями паливної апаратури за рахунок зміни параметрів налаштування електронного блоку управління, наявністю системи контролю емісії EOBD стадії II (бортової діагностики), для якої на двигунах встановлюється додатково давач температури повітря і до системи випуску відпрацьованих газів споживач підключає давач диференціального тиску.

Двигуни ЯМЗ-53403, ЯМЗ-53423 (Рис. 1, е), ЯМЗ-53443 та їх комплектації екологічного класу «Євро-5» конструктивно виконані аналогічно базовій моделі, відрізняються паливною апаратурою, електронним блоком управління, зміною ряду установок вузлів та деталей двигуна, наявністю системи бортової діагностики (EOBD), для якої на двигуні встановлюється додатково давач температури повітря і до системи випуску відпрацьованих газів споживач підключає давач диференціального тиску.

Двигуни серії «ЯМЗ-5340» оснащуються паливною системою акумуляторного типу «Common Rail System» (Рис. 2) з електронним керуванням подачею палива виробництва фірми «Robert Bosch» (Німеччина).



**Рис. 2. Паливна системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» [10]:**

**1 – фільтр тонкого очищення палива; 2 – трубка підведення палива до паливного насоса високого тиску; 3 – трубка підведення палива до фільтра; 4 – трубка підведення палива до насоса низького тиску; 5 – електронний блок управління; 6 – форсунка; 7 – штуцер бічний; 8 – трубки високого тиску; 9 – рампа; 10 – трубка високого тиску підведення палива до рампи; 11 – паливний насос високого тиску із насосом низького тиску; 12 – трубка підведення палива до двигуна**

Система «Common Rail» з електронним блоком керування забезпечує:

- точне дозування циклової подачі палива для кожного робочого режиму та багатофазне упорскування;



- регулювання кутів випередження упорскування палива залежно від частоти обертання, навантаження, температури;
- гнучке регулювання тиску впорскування палива в широкому діапазоні;
- легкий пуск двигуна з мінімальним викидом шкідливих речовин в атмосферу за будь-яких температурних умов;
- коригування процесу паливоподачі в залежності від умов довкілля з метою зниження викидів шкідливих речовин;
- сумісність з електронними системами автомобіля та бортовою системою контролю і діагностування по каналу CAN, забезпечує процес діагностування, виконує функції обмеження швидкості, аварійного захисту двигуна, круїз-контролю та дублювання управління від додаткового органу з пульта оператора.

Для реалізації завдання автоматизації процесу діагностики необхідно розробити моделі компонентів внутрішнього згоряння двигуна як об'єктів для діагностики. Ці моделі повинні описувати взаємозв'язки між безліччю можливих несправностей та безліччю значень діагностичних параметрів на одному математичному рівні.

Заміщення об'єкта діагностики ідеалізованою моделлю включає ідентифікацію ключових, суттєвих для діагностики, компонентів та властивостей, які пов'язані із завданням визначення реального технічного стану об'єкта. При цьому кількість елементів та зв'язків об'єкта, які є основними для його функціонування та виконання певної функції, залишаються меншими і можуть бути виключені при розробці моделі технічного пристрою як об'єкта для діагностики.

Заміщення реальних технічних компонентів їх ідеалізованими моделями дозволяє використовувати різноманітні математичні методи. Під математичною моделлю об'єкта для діагностики виконується велика кількість логічних, аналітичних, статистичних, графічних та інших якісних зв'язків, які пов'язують вихідні параметри об'єкта з його внутрішніми та вхідними параметрами.

Універсальним варіантом моделі для діагностики об'єкта може бути відображено його як "чорного ящика", де вхідні та вихідні параметри обмежені додатковими можливими значеннями. При цьому визначається, що всі можливості об'єкта обмежено обмеженою кількістю станів. У цьому випадку об'єкт виявлений «чорним ящиком» не тому, що його внутрішня структура та параметри невідомі, а через обмеження доступу до них, і стан об'єкта може бути визначений лише шляхом дослідження його вихідних параметрів (без розбору). [11, 12].

Для представлення об'єкта діагностування у вигляді «чорного ящика» потрібно задати (Рис. 3):

- кількість всіх вхідних дій  $Y$  від стимулюючих пристроїв і зовнішнього середовища;
- кількість всіх вихідних ознак несправності  $S$  об'єкта діагностування;
- кількість всіх несправностей  $X$  об'єкта діагностування;
- оператор  $A$ , який перетворює кількості  $X$  та  $Y$  в кількість  $S$ :

$$S = A\{Y, X\}. \quad (1)$$

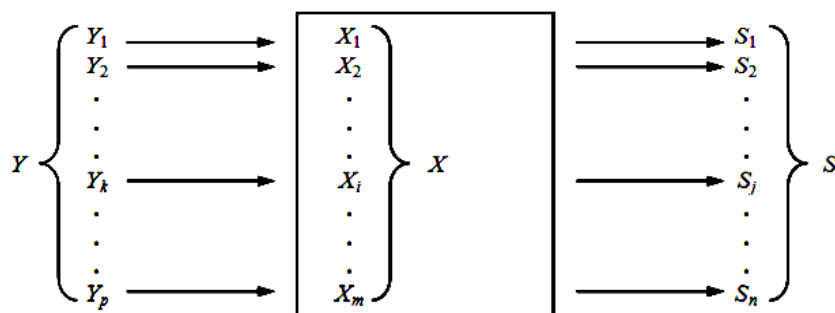


Рис. 3. Представлення об'єкта діагностування у вигляді «чорного ящика»

Маючи на увазі, що під час діагностування елементи кількості  $Y$  стабілізуються (або змінюються по заданому закону), вираз (1) перетвориться у вид:

$$S = A\{X\}. \quad (2)$$

Тобто, будь-який вихідний параметр об'єкта діагностування є функцією його технічного стану при даному технічному стані входів.







або кількох циліндрах;  $x_{18}$  – порушено процес згорання;  $x_{19}$  – наявність підтікання палива в контурі низького тиску;  $x_{20}$  – наявність підтікання палива в контурі високого тиску.

Також в матриці (див. табл. 1) вводимо ознаки вище вказаних несправностей системи «Common Rail» двигунів серії «ЯМЗ-5340»:  $S_1$  – двигун не запускається;  $S_2$  – двигун запускається і одразу зупиняється;  $S_3$  – двигун не розвиває потужності;  $S_4$  – нестійка робота двигуна;  $S_5$  – підвищена димність при роботі двигуна;  $S_6$  – двигун не розвиває максимальної частоти обертання;  $S_7$  – двигун раптово зупиняється;  $S_8$  – підвищена витрата палива;  $S_9$  – підвищена вібрація двигуна.

Таблиця 1

Матриця діагностування системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340»

Несправність системи «Common Rail»	Ознака несправності системи «Common Rail»								
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$
$x_1$	+	-	-	-	-	-	-	-	-
$x_2$	+	-	-	-	-	-	+	-	-
$x_3$	+	-	-	-	-	-	-	-	-
$x_4$	+	+	+	+	-	-	+	-	-
$x_5$	+	+	+	+	-	+	-	-	-
$x_6$	+	+	-	-	-	-	-	-	-
$x_7$	-	+	-	-	-	-	-	-	-
$x_8$	-	+	-	+	-	-	-	-	-
$x_9$	-	+	-	-	-	+	-	-	-
$x_{10}$	-	+	-	-	-	-	-	-	-
$x_{11}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-
$x_{12}$	-	-	+	-	-	+	-	-	-
$x_{13}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-
$x_{14}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-
$x_{15}$	-	-	+	-	-	-	-	+	+
$x_{16}$	-	-	-	+	-	-	-	-	-
$x_{17}$	-	-	-	+	-	-	-	-	-
$x_{18}$	-	-	-	-	+	-	-	-	-
$x_{19}$	-	-	-	-	-	-	+	+	-
$x_{20}$	-	-	-	-	-	-	+	+	-

З таблиці 1 видно, що кожна несправність представлена певною комбінацією значень її ознак, які можуть приймати два умовних значення: «-» чи «+».

На перетині  $i$ -го рядка і  $j$ -го стовпця ставимо «+», якщо при наявності  $i$ -ої несправності відбувається вихід  $j$ -ої ознаки з області її допустимих значень, в протилежному випадку ставиться значення «-».

З метою синтезу даної матриці діагностування необхідно нескінченну кількість технічних станів об'єкта замінити кінцевою множиною технічних станів, кожний з яких пов'язано з певною несправністю (або їх комбінацією) або з працездатним станом (рис. 4).

Дане перетворення можна представити у вигляді

$$\{x_i\}_k = F_x \{x_i\}, \quad (4)$$

де  $\{x_i\}$  – множина ознак технічних станів об'єкта діагностування, кожна з яких може приймати нескінченну кількість значень;  $\{x_i\}_k$  – кінцева множина ознак технічних станів об'єкта діагностування, кожна з яких може приймати значення «-» і «+», які відповідають відсутності і наявності  $i$ -ої несправності;  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $F_x$  – оператор, який перетворює кількість  $\{x_i\}$  в кількість  $\{x_i\}_k$  наступним чином: для  $i$ -го параметру  $x_i$  присвоюється значення «-», якщо величина знаходиться в області допустимих значень, в іншому випадку присвоюється значення «+».

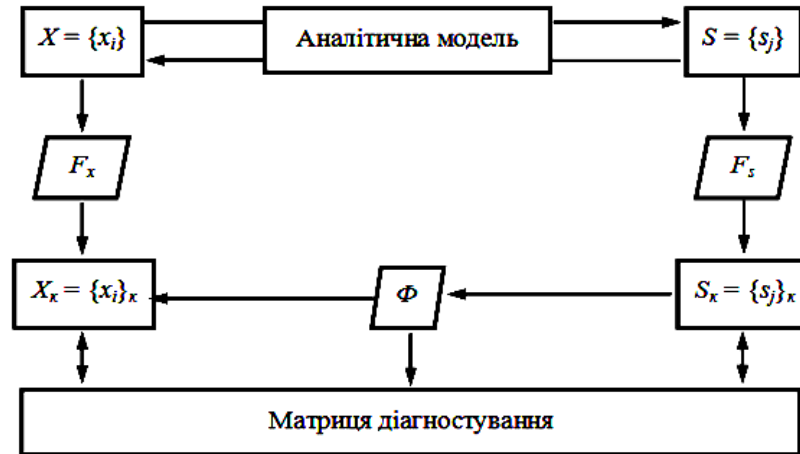


Рис. 4. Блок-схема синтезу матриці діагностування системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340»:

$X = \{x_j\}$  – нескінченна кількість технічних станів об'єкта;  $X_k = \{x_{j_k}\}$  – кінцева кількість технічних станів;  $S = \{s_j\}$  – нескінченна множина ознак технічних станів об'єкта;  $S_k = \{s_{j_k}\}$  – кінцева множина ознак технічних станів об'єкта;  $F_x$  – оператор, що перетворює кількість  $\{x_j\}$  в кількість  $\{x_{j_k}\}$ ;  $F_s$  – оператор, що перетворює кількість  $\{s_j\}$  в кількість  $\{s_{j_k}\}$ ;  $\Phi$  – оператор, що перетворює кількість технічних станів об'єкта в кількість діагностичних параметрів.

Перетворення нескінченної кількості значень параметрів вихідних процесів в кінцеву кількість значень діагностичних параметрів можна представити у вигляді

$$\{s_{j_k}\} = F_s \{s_j\}, \quad (5)$$

де  $\{s_j\}$  – кількість ознак вихідних процесів, кожна з яких може приймати в загальному випадку нескінченну кількість значень в певному інтервалі;  $\{s_{j_k}\}$  – кінцева кількість діагностичних ознак, кожна з яких може приймати тільки два умовних значення: «-» чи «+»;  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $F_s$  – оператор, який перетворює кількість  $\{s_j\}$  в кількість  $\{s_{j_k}\}$  наступним чином: будь-якій  $j$ -ій ознаці  $s_j$  присвоюється умовне значення «-», якщо величина знаходиться в області значень, що відповідають справному стану об'єкта діагностування, в іншому випадку присвоюється значення «+».

Під час виконаних перетворень отримано два кінцеві значення  $\{x_{i_k}\}$  та  $\{s_{j_k}\}$ , елементи яких пов'язані один з одним. Цей зв'язок можна представити у вигляді

$$\{s_{j_k}\} = \Phi \{x_{i_k}\}, \quad (6)$$

де  $\Phi$  – оператор, який перетворює кількість технічних станів об'єкта діагностування в кількість діагностичних параметрів.

Перетворення (6) представляє функціонування технічного об'єкта як перетворювача кількості структурних параметрів у кількість діагностичних параметрів і являє собою модифікацію моделі (1).

Перетворення (6) можна розгорнути за допомогою системи рівнянь (3).

Система (3) пов'язує кожен знак несправності  $S_j$  з структурними параметрами об'єкта діагностування, що відображає зв'язки між структурними параметрами і сигналами діагностування.

Матриця діагностування, яка являє собою модель об'єкта діагностування, показує, що вона є табличною формою запису системи рівнянь (1).

Параметр  $S_1$  в матриці діагностування можна розглядати як двозначну булеву функцію, яка залежить від аргументів  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}$ . Булева функція залежить від аргумента  $x_1$ , якщо

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_m) \neq \varphi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_m)$$

На основі цього визначення та таблиці 1, видно, що  $S_1$  залежить тільки від  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ .

Залежність  $S_1 = \varphi_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  виражається у вигляді функції логічного додавання (диз'юнкція):

$$S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6.$$

Аналіз інших ознак несправностей дозволяє представити систему рівнянь (3) для матриці діагностування системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» у вигляді:



$$\begin{cases} S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6; & S_4 = x_4 + x_5 + x_8 + x_{16} + x_{17}; & S_7 = x_2 + x_4 + x_{19} + x_{20}; \\ S_2 = x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10}; & S_5 = x_{18}; & S_8 = x_{15} + x_{19} + x_{20}; \\ S_3 = x_4 + x_5 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15}; & S_6 = x_5 + x_9 + x_{12}; & S_9 = x_{15}. \end{cases} \quad (7)$$

Всі перетворення, що призводять до синтезу моделі об'єкта діагностування у вигляді матриці діагностування, представлено на блок-схемі (Рис. 4). Коли модель об'єкта діагностування представлена у вигляді діагностичної матриці, діагностична задача формулюється наступним чином «За даними ознаками несправностей  $S_1, S_2, \dots, S_n$  отриманими при діагностичному обстеженні, потрібно визначити несправності  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , якщо відомі функціональні залежності між діагностичними параметрами та всіма структурними параметрами, що задані у вигляді матриці діагностування або системи рівнянь (7). Кожен діагностичний параметр і кожен структурний параметр приймає тільки два значення: «-» чи «+».

Для вирішення діагностичної задачі необхідне зворотне перетворення кількості параметрів діагностування в кількість структурних параметрів, тому що при діагностуванні відомими є саме значення параметрів діагностування.

Таким чином зворотне перетворення можна представити так

$$\{x_i\}_k = \Phi^{-1} \{s_j\}_k,$$

або в розгорнутому вигляді

$$\begin{cases} x_1 = f_1(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ x_2 = f_2(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ x_m = f_m(S_1, S_2, \dots, S_n). \end{cases} \quad (8)$$

Вид функцій  $f_m$  нескладно встановити в кожному конкретному випадку на основі наступних міркувань.

У матриці діагностування (табл. 1) розглянемо окремо один із рядків, наприклад, перший. З матриці видно, що несправність  $x_2$  викликає одночасно вихід ознак  $S_1$  та  $S_7$  з області їх допустимих значень. Значення інших діагностичних параметрів при наявності лише несправності  $x_5$  залишаються в межах норми. Отже,  $x_2$  є булевою функцією, в даному випадку кон'юнкція (або функцією логічного множення):

$$x_2 = S_1 S_7.$$

Аналіз інших стовпців матриці дозволяє зворотне перетворення (3) записати в вигляді системи булевих функцій:

$$\begin{cases} x_1 = S_1; & x_5 = S_1 S_2 S_3 S_4 S_6; & x_9 = S_2 S_6; & x_{13} = S_3; & x_{17} = S_4; \\ x_2 = S_1 S_7; & x_6 = S_1 S_2; & x_{10} = S_2; & x_{14} = S_3; & x_{18} = S_5; \\ x_3 = S_1; & x_7 = S_2; & x_{11} = S_3; & x_{15} = S_3 S_8 S_9; & x_{19} = S_7 S_8; \\ x_4 = S_1 S_2 S_3 S_4 S_7; & x_8 = S_2 S_4; & x_{12} = S_3 S_6; & x_{16} = S_4; & x_{20} = S_7 S_8. \end{cases} \quad (9)$$

Таким чином, процес постановки діагнозу на основі моделі об'єкта діагностування, вираженої у вигляді матриці діагностування, складається з таких етапів:

- шляхом відповідних вимірювань та перетворень (5) визначаються ознаки всіх несправностей  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ;
- значення параметрів діагностування підставляються в систему булевих функцій (8);
- обчислюються значення всіх булевих функцій несправностей  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) причому якщо  $x_i = 1$ , то в об'єкті є  $i$ -та несправність.

Виходячи з того, що об'єкт діагностування являється працездатним у випадку відсутності всіх несправностей, то функція його роботоздатності набуде такого вигляду:

$$F_p = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{20}. \quad (10)$$

Повертаючись до блок-схеми синтезу діагностичної матриці (Рис. 2), можна сформулювати умову виконання процесу діагностування наступним чином «Для здійснення процесу діагностування





достатньо, щоб зворотне перетворення кількості ознак несправностей у кількість структурних параметрів (несправностей) об'єкта було однозначним».

Якщо при синтезі матриці діагностування не виконується дана умова і в системі (8) є дві або більше рівних функцій, тоді перелік параметрів діагностування необхідно доповнити новим параметром, який увійшов би в якості додаткового аргументу лише в одну з розглянутих рівних функцій.

## 6. Висновки

Оглядаючи останні дослідження та публікації в даній сфері, було виявлено, що конкретних математичних залежностей для визначення технічного стану двигунів серії «ЯМЗ-5340» не знайдено.

Для системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» була створена матриця діагностики, в яку включено перелік можливих несправностей та їх ознака. Ця матриця діагностики є табличною формою запису математичної моделі об'єкта діагностики.

Під час створення діагностичної матриці було визначено, що в системі (8) наявні рівні функції, такі як:  $x_1 = x_3 = S_1$ ;  $x_7 = x_{10} = S_2$ ;  $x_{11} = x_{13} = x_{14} = S_3$ ;  $x_{22} = x_{23} = S_3$ ;  $x_{16} = x_{17} = S_4$ ;  $x_{19} = x_{20} = S_7$ ;  $S_8$ . Таким чином, кількість параметрів діагностики для системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» слід розширити шляхом додавання нових параметрів, які використовувалися як додаткові аргументи лише для одного з представлених рівнів функцій.

Подана математична модель для автоматизації діагностики процесики системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» потребує включення нових додаткових параметрів діагностики, що стане об'єктом подальших наукових досліджень.

## Список використаних джерел

1. Канарчук В. Є., Курніков І. П. Виробничі системи на транспорті. Київ : Вища школа, 1997. 359 с.
2. Канарчук В. Є., Лудченко О. А., Чигринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. В 3 кн. Кн. 1. Теоретичні основи. Київ : Вища школа, 1994. 384 с.
3. Канарчук В. Є., Лудченко О. А., Чигринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. В 3 кн. Кн. 2. Організація, планування і управління. Київ : Вища школа, 1994. 383 с.
4. Канарчук В. Є., Лудченко О. А., Чигринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. В 3 кн. Кн. 3. Ремонт автотранспортних засобів. Київ : Вища школа, 1994. 495 с.
5. Кукурудзяк Ю. Ю., Біліченко В. В. Технічна експлуатація автомобілів. Організація технологічних процесів ТО і ПР. Вінниця : ВНТУ, 2010. 198 с.
6. Чабанний В. Я. Ремонт автомобілів. Кіровоград : Кіровоградська районна друкарня, 2007. 720 с.
7. Коваленко В. М., Щуріхін В. К. Діагностика і технологія ремонту автомобілів. Київ : Літера ЛТД, 2017. 224 с.
8. Борисюк Д. В., Яцковський В. І. Методи та засоби діагностування тракторів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.* 2015. № 1 (89). Т. 2. С. 16–20.
9. Анісімов В. Ф., Борисюк Д. В., Черкевич О. В. Системи діагностування сільськогосподарських тракторів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2016. № 2 (94). С. 34–36.
10. Кислик В. Ф., Лушчик В. В. Будова й експлуатація автомобілів. Київ : Либідь, 2018. 400 с.
11. Борисюк Д. В., Біліченко В. В., Зелінський В. Й. Математична модель ударно-спускового механізму автомата Калашникова як об'єкта діагностування. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2018. Вип. 2 (8). С. 4–14.
12. Борисюк Д. В., Біліченко В. В., Зелінський В. Й. Математична модель ударно-спускового механізму пістолета Макарова як об'єкта діагностування. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2019. Вип. 1 (9). С. 15–26.
13. Борисюк Д. В. *Математична модель процесу діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011. Наукові праці Вінницького національного технічного університету.* 2021. Вип. 2 (13). С. 1–13. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/634/596>
14. Борисюк Д. В., Зелінський В. Й., Твердохліб І. В., Полевода Ю. А. Математична модель автоматизації процесу діагностування двигунів внутрішнього згорання сімейства ЯМЗ-238. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2021. № 4 (115). С. 12–23.



15. Борисюк Д. В., Зелінський В. Й., Твердохліб І. В., Полевода Ю. А. Математична модель автоматизації процесу діагностування ведучих мостів автомобілів «КамАЗ». *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2 (117). С. 15–24.
16. Борисюк Д. В., Зелінський В. Й., Березняк М. С. Причинно-наслідкові зв'язки параметрів основних ресурсних груп двигуна ЯМЗ-238. *Матеріали XV міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 24-26 жовтня 2022 року: збірник наукових праць*. 2022. С. 30–35.
17. Борисюк Д. В., Зелінський В. Й., Спірін А. В., Твердохліб І. В. Причинно-наслідкові зв'язки параметрів основних ресурсних груп двигунів ЯМЗ-236/238. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 4 (119). С. 16–23.
18. Борисюк Д. В. Формування словника діагностичних ознак при віброакустичному діагностуванні тракторів і автомобілів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: VI-а Міжн. наук.-практ. інтернет-конф., м. Вінниця, 12-13 квітня 2018 р.: тези доповіді*. 2018. С. 28–30.
19. Borysiuk D., Spirin A., Trukhanska O., Shvets L., Zelinsky V. Mathematical model of a wheeled tractor steering axle as an object of diagnostics. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2017. Vol. 17 (1). P. 41–47.
20. Борисюк Д. В. Математична модель зчеплення автомобіля Volkswagen Polo Sedan як об'єкта діагностування. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. Вип. 1 (13). С. 23–32.
21. Борисюк Д. В. Математична модель коробки перемикач передач типу ЯМЗ-239 як об'єкта діагностування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. Вип. 3 (156). С. 93–104.
22. Борисюк Д. В. Вибір та обґрунтування параметрів вібродіагностування керованих мостів колісних тракторів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 / Державний університет «Житомирська політехніка». Житомир, 2020. 21 с.

#### References

- [1] Kanarchuk, V.E., Kournikov, I.P. (1997). *Vyrobnychi systemy na transporti [Production systems for transport]*. Kyiv : Higher School. [in Ukrainian].
- [2] Kanarchuk, V.Ye., Ludchenko, O.A., Chyhrynets, A.D. (1994). *Osnovy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu avtomobiliv [Basics of car maintenance and repair. Theoretical foundations. Technology]*. (Vols. 1-3). Kyiv : Higher School. [in Ukrainian].
- [3] Kanarchuk, V.Ye., Ludchenko, O.A., Chyhrynets, A.D. (1994). *Orhanizatsiya, planuvannya i upravlinnya [Organization, planning and management]*. (Vols. 1-3). Kyiv : Higher School. [in Ukrainian].
- [4] Kanarchuk, V.Ye., Ludchenko, O.A., Chyhrynets, A.D. (1994). *Remont avtotransportnykh zasobiv [Repair of vehicles]*. (Vols. 1-3). Kyiv : Higher School. [in Ukrainian].
- [5] Kukurudziak, Yu.Yu., Bilichenko, V.V. (2010). *Tekhnichna ekspluatatsiya avtomobiliv. Orhanizatsiya tekhnologichnykh protsesiv TO i PR [Technical operation of cars. Organization of technological processes of maintenance and repair]*. Vinnytsia : VNTU. [in Ukrainian].
- [6] Chabanny, V.Ya. (2007). *Remont avtomobiliv [Car repair]*. Kirovograd : Kirovograd district printing house. [in Ukrainian].
- [7] Kovalenko, V.M., Shchurikhin, V.K. (2017). *Diahnostyka i tekhnolohiya remontu avtomobiliv [Diagnosis and technology of car repair]*. Kyiv : Litera LTD. [in Ukrainian].
- [8] Borisyuk, D.V., Yatskovsky, V.I. (2015). *Metody ta zasoby diahnostuvannya traktoriv [Methods and tools for diagnosing tractors]*. *Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences, 1 (89)*. 2, 16–20 [in Ukrainian].
- [9] Anisimov, V.F., Borisyuk, D.V., Cherkevich O.V. (2016). *Systemy diahnostuvannya sil'skohospodars'kykh traktoriv [Diagnostic systems for agricultural tractors]*. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 2 (94), 34–36. [in Ukrainian].
- [10] Kyslykov, V.F., Lushchyk, V.V. (2018). *Budova y ekspluatatsiya avtomobiliv [Construction and operation of cars]*. Kyiv : Lybid'. [in Ukrainian].
- [11] Borisyuk, D.V., Bilichenko, V.V., Zelinsky, V.Y. (2018). *Matematychna model' udarno-spuskovoho mekhanizmu avtomata Kalashnykova yak ob'yekta diahnostuvannya [Mathematical model of the shock-trigger mechanism of the Kalashnikov assault rifle as an object of diagnosis]*. *Bulletin of machine building and transport*, 2 (8), 4–14. [in Ukrainian].



- [12] Borysyuk, D.V., Bilichenko, V.V., Zelinsky, V.Y. (2019). Matematychna model' udarno-spuskovoho mekhanizmu pistoleta Makarova yak ob'yekta diahnostuvannya [Mathematical model of the shock-trigger mechanism of the Makarov pistol as an object of diagnosis]. *Bulletin of machine building and transport*, 1 (9), 15–26. [in Ukrainian].
- [13] Borysiuk, D.V. (2021). Matematychna model' protsesu diahnostuvannya turbokompresora YAMZ-650.1118011 [Mathematical model of the YaMZ-650 turbocharger diagnosis process.1118011]. *Scientific works of Vinnytsia National Technical University*, 2 (13), 1-13. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/634/596>. [in Ukrainian].
- [14] Borysyuk, D.V., Zelinskyi, V.Y., Tverdokhlib, I.V., Polevoda, Yu.A. (2021). Matematychna model' avtomatyzatsiyi protsesu diahnostuvannya dvyhuniv vnutrishn'oho z-horannya simeystva YAMZ-238 [Mathematical model of automation of the process of diagnosing internal combustion engines of the YaMZ-238 family]. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 4 (115), 12–23. [in Ukrainian].
- [15] Borysyuk, D.V., Zelinskyi, V.Y., Tverdokhlib, I.V., Polevoda, Yu.A. (2022). Matematychna model' avtomatyzatsiyi protsesu diahnostuvannya veduchykh mostiv avtomobiliv «KamAZ» [Mathematical model of the automation of the process of diagnosing the driving axles of KamAZ cars.]. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 2 (117), 15–24. [in Ukrainian].
- [16] Borysyuk, D.V., Zelinskyi, V.Y., Berezhnyak, M.S. (2022). Prychynno-naslidkovi zv'yazky parametriv osnovnykh resursnykh hrup dvyhuna YAMZ-238 [Cause-and-effect relationships of the parameters of the main resource groups of the YaMZ-238 engine]. *Materials of the XV international scientific and practical conference "Modern technologies and prospects for the development of road transport", October 24-26, 2022: a collection of scientific works*, 30–35. [in Ukrainian].
- [17] Borysyuk, D.V., Zelinskyi, V.Y., Spirin, A.V., Tverdokhlib, I.V. (2022). Prychynno-naslidkovi zv'yazky parametriv osnovnykh resursnykh hrup dvyhuniv YAMZ-236/238 [Cause-and-effect relationships of the parameters of the main resource groups of YaMZ-236/238 engines]. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 4 (119), 16–23. [in Ukrainian].
- [18] Borysiuk, D.V. (2018). Formuvannya slovnyka diahnostychnykh oznak pry vibroakustychnomu diahnostuvanni traktoriv i avtomobiliv [Formation of a dictionary of diagnostic signs during vibroacoustic diagnosis of tractors and cars]. *Problems and prospects of the development of road transport: 6th Inter. science and practice internet conference, Vinnytsia, April 12-13: abstracts of the report*, 28–30. [in Ukrainian].
- [19] Borysiuk, D., Spirin, A., Trukhanska, O., Shvets, L., Zelinsky, V. (2017). Mathematical model of a wheeled tractor steering axle as an object of diagnostics. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 17 (1), 41–47. [in English].
- [20] Borysyuk, D.V. (2021). Matematychna model' zcheplennya avtomobilya Volkswagen Polo Sedan yak ob'ekta diahnostuvannya [Mathematical model of the clutch of the Volkswagen Polo Sedan car as an object of diagnostics]. *Bulletin of machine building and transport*, 1 (13), 23–32. [in Ukrainian].
- [21] Borysyuk, D.V. (2021). Matematychna model' korobki peremikannya peredach tipu YAMZ-239 yak ob'ekta diahnostuvannya [Mathematical model of the YAMZ-239 type gearbox as an object of diagnosis]. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 3 (156), 93–104. [in Ukrainian].
- [22] Borysyuk, D.V. (2020). Vibir ta obgruntuvannya parametriv vibrodiagnostuvannya kerovanikh mostiv kolisnykh traktoriv : avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk [Selection and substantiation of parameters for vibration diagnostics of steered axles of wheeled tractors: autoref. thesis for obtaining sciences. candidate degree technical Sciences]. Zhytomyr Polytechnic State University. Zhytomyr. [in Ukrainian].

#### MATHEMATICAL MODEL OF THE AUTOMATION OF THE COMMON RAIL SYSTEM DIAGNOSTIC PROCESS OF THE YAMZ-5340 SERIES DIVIGUNS

*Failures of systems and mechanisms of the internal combustion engine are among the first among the total number of failures of tractors and cars. To determine them, a significant number of methods and means of determining the technical condition (diagnosis) are used. Functional-cost analysis is a heuristic method aimed at identifying the possibilities of reducing the cost and increasing the quality of the object, which is considered as a system with an orientation to a functional approach at all stages of its life cycle.*

*This scientific article presents a functional and cost analysis of the anti-lock braking system of cars. A functional model of this system was developed and its functions were classified.*



*The classification of the functions of the functional model of the anti-lock braking system of cars is also presented. The utility coefficients of this system are actually determined by constructing a matrix of advantages according to the known methodology.*

*The generalizing cost criterion in the design of technical and production systems takes into account costs at all stages of the system's life cycle. To estimate these costs, a matrix of the anti-lock braking system of cars was created, with which the cost factors are calculated.*

*Constructed function utility diagrams, function location, function-cost and cost diagrams allowed to use the functions of the anti-lock braking system of cars, which have a positive function-cost indicator and the highest rating among the presented functions. Such an operation or functions, marked by the highest functional value indicator and rank, are key to the further development of the system or the achievement of the goal of the analysis.*

**Key words:** *functional cost analysis, ABS system, functional model, function classification, utility factor, priority matrix, cost factor, function utility diagram, function location diagram, functional cost diagram, function cost diagram.*

**F. 10. Fig. 4. Table 1. Ref. 22.**

### **ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

**Борисюк Дмитро Вікторович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, вул. Воїнів-Інтернаціоналістів, 7, ауд. 3222, e-mail: bddv@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8572-6959>).

**Твердохліб Ігор Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor\_tverdokhlib@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1350-3232>).

**Купчук Ігор Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, +380978173992, e-mail: kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Цуркан Олександр Васильович** – магістрант Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: otsurkan\_v@gmail.com).

**Dmytro Borysiuk** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the department of automobiles and transport management of Vinnytsia National Technical University (21021, Vinnytsia, Voinov-Internationalistov st., 7, room 3222, e-mail: bddv@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8572-6959>).

**Igor Tverdokhlib** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinnytsia, st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, e-mail: igor\_tverdokhlib@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1350-3232>).

**Ihor Kupchuk** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, +380978173992, e-mail: kupchuk.igor@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Oleksandr Tsurkan** – master's student Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinnytsia, st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, e-mail: otsurkan\_v@gmail.com).