

Борисюк Д.В., доцент кафедри автомобілів
та транспортного менеджменту, к.т.н., доцент
Прокопович А.О., магістрант кафедри автомобілів
та транспортного менеджменту
Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ СИСТЕМИ «COMMON RAIL» ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Запропонована математична модель автоматизації процесу діагностування системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340», яка дозволить виявити несправності її вузлів та деталей в залежності від їх ознак.

Ключові слова: математична модель, діагностування, двигун, система «Common Rail», матриця діагностування, блок-схема, несправність, ознака несправності.

Відмови систем та механізмів двигуна внутрішнього згорання стоять в ряду перших із загального числа відмов автотракторної техніки [1, 2]. Для їх визначення використовується значна кількість методів і засобів діагностування.

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

Вирішення задачі автоматизації логічного процесу постановки діагнозу вимагає розробки моделей елементів двигуна внутрішнього згорання як об'єктів діагностування, що описують на одному математичному рівні взаємозв'язки між безліччю можливих несправностей і безліччю значень діагностичних параметрів.

Заміна об'єкта діагностування моделлю пов'язана з виділенням основних, істотних для постановки діагнозу елементів і властивостей, пов'язаних із завданням визначення дійсного технічного стану об'єктів. При цьому деяка кількість елементів і зв'язків об'єкта, виключно важливих з точки зору його функціонування як пристрою, призначеного для виконання певної роботи, стають другорядними і при розробці моделі технічного пристрою, як об'єкта діагностування, можуть бути виключені.

Заміна реальних технічних пристроїв їх ідеалізованими моделями дозволяє широко використовувати різні математичні методи. Під математичною моделлю об'єкта діагностування слід розуміти безліч аналітичних, логічних, статистичних, графічних і взагалі будь-яких якісних співвідношень, які пов'язують вихідні параметри об'єкта з його вхідними і внутрішніми параметрами.

Найбільш універсальною моделлю об'єкта діагностування є представлення його у вигляді «чорного ящика», вхідні і вихідні параметри якого мають кінцеву множину значень. Передбачається, що всі можливі стани об'єкта утворюють кінцеву множину станів. В даному випадку об'єкт є «чорним ящиком» не тому, що його внутрішня структура і параметри повністю не відомі, а тому, що накладається заборона на доступ до них і стан об'єкта можна визначати, тільки досліджуючи його вихідні параметри (без розбирання) [3, 4].

Для представлення об'єкта діагностики у вигляді «чорного ящика» необхідно задати (рис. 1):

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

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

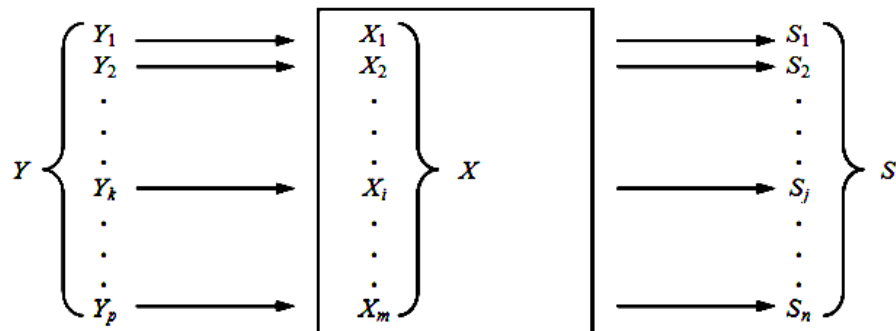


Рисунок 1 – Представлення об'єкта діагностування у вигляді «чорного ящика»

Враховуючи, що при діагностуванні елементи кількості Y стабілізуються (або змінюються по заданому закону), вираз (1) перетвориться у вид:

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

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

Якщо несправність об'єкта діагностування $\{X_i\}$ віднести до вихідних параметрів автоматизованої системи, то діагностична задача формулюється наступним чином: по відомим ознакам несправності $\{S_j\}$ визначити невідомі несправності об'єкта діагностування $\{X_i\}$.

Для успішного вирішення цього завдання необхідно знати вид оператора A , іншими словами, необхідний вичерпний опис зв'язків між усіма вихідними параметрами і всіма можливими станами (несправностями) об'єкта.

Нижче описується ряд моделей об'єктів діагностування, що відрізняються один від одного різними формами опису зазначених зв'язків.

При наявності аналітичної моделі об'єкта діагностування завдання постановки діагнозу в загальному вигляді формулюється таким чином. За даними ознаками несправності S_1, S_2, \dots, S_n , отриманих в результаті відповідних вимірювань, визначити технічний стан (несправності) об'єкта діагностування X_1, X_2, \dots, X_m , якщо відомі функціональні залежності між кожним діагностичним сигналом і структурними параметрами:

$$\begin{cases} S_1 = \phi_1(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ S_2 = \phi_2(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots \\ S_j = \phi_j(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots \\ S_n = \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{cases} \quad (3)$$

Система рівнянь (3) є математичною моделлю об'єкта діагностування, що має m структурних параметрів і n діагностичних сигналів.

Очевидною перевагою постановки діагнозу з використанням аналітичної моделі є можливість отримання конкретної несправності об'єкта діагностування, що дозволяє визначити технічний стан об'єкта не тільки в момент діагностування, але і, накопичуючи інформацію, отриману за кілька діагностичних обстежень об'єкта, аналізувати зміну структурних параметрів з метою прогнозування його технічного стану.

Однак практичне використання такої аналітичної моделі поки обмежено в силу таких обставин:

- вид функцій ϕ_j для більшості вузлів і механізмів поки не встановлений;
- якщо функція ϕ_j не задовольняє умовам безперервності і диференціювання по кожному з своїх аргументів, що зазвичай має місце в реальних моделях, то рішення системи рівнянь (3) пов'язано з великими математичними труднощами;
- більшість діагностичних параметрів, в принципі не можуть бути виражені у вигляді аналітичних функцій структурних параметрів.

У ряді робіт з технічного діагностування машин і механізмів, можливі технічні стани (несправності) агрегатів і систем та ознаками цих несправностей описуються у вигляді так званих діагностичних матриць [5-11].

З досвіду експлуатації двигунів ЯМЗ-5340/5341/5342/5343 всіх модифікацій [1, 3, 9] в табл. 1 представлена матриця діагностування системи «Common Rail».

В матриці (див. табл. 1) позначимо наступні несправності системи «Common Rail» двигунів серії «ЯМЗ-5340»: x_1 – неправильно встановлено роз'єми джгутів в електронний блок управління; x_2 – обрив або замикання проводів джгута (форсунок, давачів або проміжного джгута від електронного блока управління до автомобіля); x_3 – несправні обидва давачі частоти обертання колінчастого та розподільного валів; x_4 – ускладнена подача палива через контур низького тиску; x_5 – наявність повітря в контурі низькому тиску; x_6 – несправний контур високого тиску; x_7 – підвищений опір у контурі низького тиску; x_8 – несправний давач частоти обертання колінчастого або розподільного валів; x_9 – не відповідають нормі зазор між давачем частоти обертання розподільного вала та шестернею; x_{10} – замикання дроту джгута форсунок на «масу»; x_{11} – несправні давачі педалі акселератора; x_{12} – відкрито аварійний (обмежувальний) клапан у паливній рампі; x_{13} – обмежений крутний момент двигуна через перегрів двигуна (зменшена циклова подача палива для зниження теплового навантаження на систему охолодження); x_{14} – засмічений змінний фільтр для палива фільтра тонкого очищення; x_{15} – несправна одна або кілька форсунок; x_{16} – наявність масла в роз'ємі електронного блока управління через негерметичність джгута проводів форсунок; x_{17} – відсутнє згоряння палива в одному 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_{19}	-	-	-	-	-	-	+	+	-
x_{20}	-	-	-	-	-	-	+	+	-

Як видно з табл. 1, кожна несправність характеризується певною комбінацією значень її ознак, які можуть приймати два умовних значення: «-» або «+».

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

Для синтезу такої матриці 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. 2).

Таке перетворення може бути записано 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 в загальному випадку нескінченну кількість значень;

$\{x_i\}_k$ - кінцева множина ознак технічних станів об'єкта діагностування, кожна з яких може приймати лише два умовних значення «-» і «+», які відповідають відсутності та 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 будь-якого i -го параметру x_i присвоюється значення «-», якщо величина лежить в області допустимих значень, в протилежному випадку присвоюється значення «+».

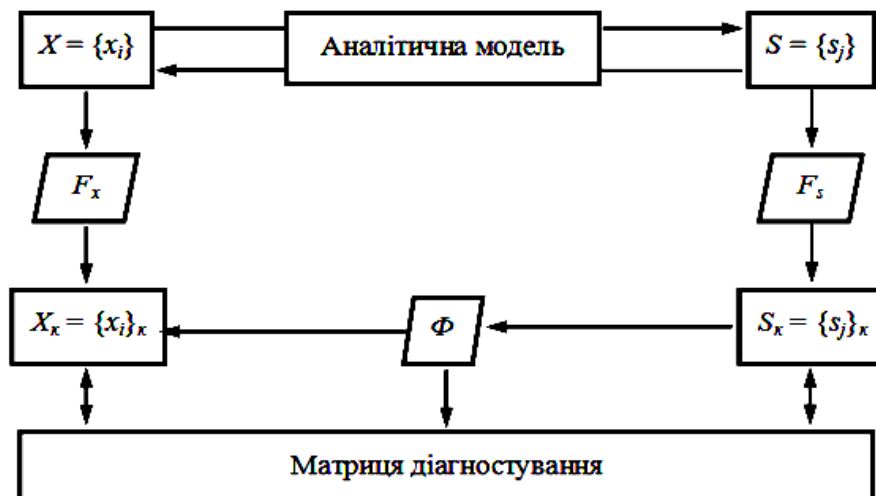


Рисунок 2 – Блок-схема синтезу матриці діагностування системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340»:

$X = \{x_i\}$ - нескінченна кількість технічних станів об'єкта; $X_k = \{x_{ij}\}_k$ - 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, перетворюючий кількість $\{x_i\}$ в кількість $\{x_i\}_k$; F_s - оператор, що перетворює кількість $\{s_j\}$ в кількість $\{s_j\}_k$; Φ - 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 може бути записано 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: «-» або «+»;

$$j = 1, 2, \dots, n;$$

F_s - оператор, що перетворює кількість $\{s_j\}$ в кількість $\{s_j\}_k$ наступним чином: будь-якій j -ій ознаці s_j присвоюється умовне значення «-», якщо величина лежить в області значень, що відповідають справному стану об'єкта діагностування, в протилежному випадку присвоюється значення «+».

В результаті проведених перетворень отримано два кінцевих значення $\{x_i\}_k$ і $\{s_j\}_k$, елементи яких певним чином пов'язані один з одним.

У загальному вигляді цей зв'язок може бути виражений у вигляді

$$\{s_j\}_k = \Phi \{x_i\}_k, \quad (6)$$

де Φ - оператор, що перетворює кількість технічних станів об'єкта в кількість діагностичних параметрів.

Перетворення (6) відображає функціонування будь-якого технічного об'єкта як перетворювача кількості структурних параметрів у кількість діагностичних параметрів і є модифікацією моделі (1).

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

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

Матриця діагностування, як модель об'єкта діагностування, показує, що вона є по суті справи 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 має місце співвідношення

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

Як впливає з цього визначення та табл. 1, S_1 істотно залежить тільки від $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$.

Залежність $S_1 = \phi_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ виражається в даному випадку в вигляді функції логічного додавання (диз'юнкція):

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

Відповідний аналіз інших ознак несправностей дозволяє записати систему рівнянь (3) для даної 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 послідовні перетворення, що призводять до синтезу моделі об'єкта діагностування у вигляді діагностичної матриці, наочно представлені на блок-схемі (див. рис. 4). У тому випадку, 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 в момент перевірки, якщо відомі функціональні залежності між діагностичними параметрами і всіма структурними параметрами, що задані у вигляді діагностичної матриці або системи рівнянь типу (7). Кожен структурний параметр і кожен діагностичний параметр приймає тільки два значення: «-» або «+».

Очевидно що для вирішення діагностичної задачі необхідне зворотне перетворення кількості діагностичних параметрів в кількість структурних параметрів, тому що при постановці діагнозу відомими є саме значення діагностичних параметрів.

У загальному вигляді зворотне перетворення можна представити виразом

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

або в розгорнутому вигляді

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

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

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

$$x_2 = S_1 S_7.$$

Відповідний аналіз всіх інших стовпців розглянутої матриці дозволяє зворотне перетворення (3) записати в вигляді системи булевих функцій:

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

Як видно з цього прикладу, процес постановки діагнозу на основі моделі об'єкта діагностування, вираженої у вигляді діагностичної матриці, складається з наступних етапів:

- шляхом відповідних вимірювань і перетворень (5) встановлюються ознаки всіх несправностей S_1, S_2, \dots, S_n ;
- значення діагностичних параметрів 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 є працездатним лише у випадку відсутності всіх несправностей, то функція його робоздатності набуде вигляду:

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

Повертаючись до блок-схеми синтезу матриці діагностування (див. рис. 2), можна сформулювати в загальному вигляді умову здійснення діагностування наступним чином: для здійснення діагностування достатньо, щоб зворотне перетворення кількості ознак несправностей у кількість структурних параметрів (несправностей) об'єкта було однозначним.

Якщо при синтезі діагностичної матриці не виконана ця умова і в системі (8) є дві або більше рівних функцій, то перелік діагностичних параметрів необхідно доповнити новим параметром, який увійшов би в якості додаткового аргументу тільки в одну з розглянутих рівних функцій.

Висновки.

1. В ході аналізу останніх досліджень і публікацій з представленої теми встановлено, що конкретних математичних залежностей визначення технічного стану двигунів серії «ЯМЗ-5340» не виявлено.

2. Для системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» складена матриця діагностування, яка включає перелік несправностей та ознак несправностей. Матриця діагностування, як модель об'єкта діагностування, показує, що вона є табличною формою запису математичної моделі об'єкта діагностування.

3. При синтезі матриці діагностування виявлено, що в системі (8) є такі рівні функції 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, перелік діагностичних параметрів системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» необхідно доповнити новими параметрами, які увійшли би в якості додаткових аргументів тільки в одну з розглянутих рівних функцій.

4. Розроблена математична модель автоматизації процесу діагностування системи «Common Rail» дизелів серії «ЯМЗ-5340» вимагає введення нових додаткових діагностичних параметрів, що є предметом подальших наукових досліджень даного напрямку.

Література

1. Канарчук В.Є., Курніков І.П. Виробничі системи на транспорті. Київ : Вища школа, 1997. 359 с.
2. Кукурудзяк Ю.Ю., Біліченко В.В. Технічна експлуатація автомобілів. Організація технологічних

процесів ТО і ПР. Вінниця : ВНТУ, 2010. 198 с.

3. Коваленко В.М., Щуріхін В.К. Діагностика і технологія ремонту автомобілів. Київ : Літера ЛТД, 2017. 224 с.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Borysiuk D., Spirin A., Trukhanska O., Shvets L., Zelinsky V. Mathematical model of a wheeled tractor steering axle as an object of diagnostics. *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture.* 2017. Vol. 17, No.1. P. 41-47.

11. Борисюк Д. В. Математична модель зчеплення автомобіля Volkswagen Polo Sedan як об'єкта діагностування. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2021. Випуск 1 (13). С. 23-32.