



УДК 621.436

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-2

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ СІМЕЙСТВА ЯМЗ-238**

Борисюк Дмитро Вікторович, к.т.н., старший викладач
Зелінський Вячеслав Йосипович, асистент
Вінницький національний технічний університет
Твердохліб Ігор Вікторович, к.т.н., доцент
Полєвода Юрій Алікович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

Dmytro Borysiuk, Candidate of Technical Sciences (Ph. D. in Eng.), Senior Lecturer
Viacheslav Zelinskyi, Assistant
Vinnitsia National Technical University
Igor Tverdokhlib, Candidate of Technical Sciences (Ph. D. in Eng.)
Yurii Polievoda, Candidate of Technical Sciences (Ph. D. in Eng.)
Vinnitsia National Agrarian University

Конструктивне вдосконалення мобільних енергетичних засобів, зокрема їх основного агрегату – двигуна внутрішнього згорання, спрямоване на: забезпечення диференціації величини параметрів функціонування механізмів систем в залежності від мінливості умов і режимів експлуатації машин; підвищення технічного ресурсу при використанні машин за призначенням в заданих умовах експлуатації.

При аналізі літературних джерел було встановлено, що існуючі методи та засоби діагностування двигунів транспортних засобів не в повній мірі дозволяють визначати їх поточний технічний стан, що вимагає розробки математичних моделей автоматизації процесу діагностування їх вузлів та деталей.

В якості об'єкта діагностування обрано дизельний двигун внутрішнього згорання сімейства ЯМЗ-238, який входить до складу силового агрегату більшості транспортних засобів.

В статті представлено математичну модель автоматизації процесу діагностування двигунів внутрішнього згорання сімейства ЯМЗ-238.

Заміна реальних технічних пристроїв їх ідеалізованими моделями дозволяє широко застосовувати різні математичні методи. В даному випадку двигун внутрішнього згорання сімейства ЯМЗ-238, як об'єкт діагностування, представлено у вигляді «чорного ящика», вхідні і вихідні параметри якого мають кінцеву множину значень. В загальному вигляді математична модель представляє собою систему функціональних залежностей між кожним діагностичним сигналом і структурними параметрами.

Для двигунів внутрішнього згорання сімейства ЯМЗ-238 складена матриця діагностування, яка включає перелік несправностей та ознак несправностей.

Визначено, що процес постановки діагнозу на основі моделі об'єкта діагностування можливий, якщо зворотне перетворення кількості ознак несправностей у кількість структурних параметрів (несправностей) об'єкта було однозначним.

Запропонована математична модель автоматизації процесу діагностування двигунів внутрішнього згорання сімейства ЯМЗ-238 дозволить виявити несправності вузлів та деталей в залежності від їх ознак.

Ключові слова: математична модель, діагностування, двигун внутрішнього згорання, матриця діагностування, блок-схема, несправність, ознака несправності, булева функція.

Ф. 10. Рис. 2. Табл.1 Літ. 25.

1. Вступ

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.



Методи визначення технічного стану дизельних двигунів, що використовуються на практиці, як правило, вимагають часткового розбирання вузла або агрегату, а будь-яка розбирально-складальна операція, навіть якщо деталь не ремонтується, знижує термін служби вузла до 15-20% [3]. Тому для визначення технічного стану двигунів необхідно використовувати сучасні безконтактні та нерозбірні методи діагностування, які засновані на аналізі вихідних параметрів, функціонально пов'язаних зі структурними параметрами.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

В даний час діагностування дизельних двигунів здійснюється декількома методами із застосуванням різного устаткування. Великий внесок у розробку методів і засобів діагностування дизельних двигунів внесли: Астахов І.В. [4], Баширов Р.М. [5], Бишов М.В. [6], Ждановський М.С. [7], Загородських Б.П. [8], Кокорев Г.Д. [9], Ніколаєнко О.В. [10], Успенський І.А. [11] та ін. Методи технічного діагностування дизельних двигунів, що отримали поширення, як правило, виконуються при їх частковому розбиранні.

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

Питанням проектування систем діагностування присвячені роботи Глазунова Л.П. [12], Біргера І.А [13], Карибського В.В. [14], Нікіфорова С.Н. [15], Мірошникова Л.В. [16], Сергєєва А.Г. [17] та ін.

Аналіз літературних і наукових джерел показав, що існуючі методи та засоби діагностування двигунів внутрішнього згорання, не в повній мірі відповідають сучасним вимогам щодо визначення їх поточного технічного стану, що вимагає розробки математичних моделей автоматизації процесу діагностування їх основних частин.

Отже, процес визначення технічного стану автотракторних двигунів сімейства ЯМЗ-238 та його автоматизація є актуальною науково-технічною задачею.

3. Мета та завдання дослідження

Надійність транспортного засобу залежить від надійності його вузлів та агрегатів, і одним з таких агрегатів є двигун внутрішнього згорання.

Метою дослідження є підвищення надійності функціонування такого важливого агрегату транспортного засобу, як двигун внутрішнього згорання сімейства ЯМЗ-238, за рахунок створення математичної моделі автоматизації процесу діагностування його вузлів та деталей.

4. Результати досліджень

Двигуни виробництва ПАТ «Автодизель» (ЯМЗ) – це двигуни багатоцільового призначення. Технічні характеристики, універсальність, висока ступінь уніфікації і ремонтпридатність сприяють їх широкому застосуванню на автомобілях та інших енергетичних засобах різного призначення.

Найбільшого поширення серед двигунів ПАТ «Автодизель» (ЯМЗ) має сімейство дизелів ЯМЗ-238. Якщо дивитися на двигун ЯМЗ-238, то від сімейства двигунів ЯМЗ-236 він відрізняється незначно – до V- подібного шестициліндрового агрегату додали по одному циліндру в кожен ряд, отримавши при цьому восьмициліндровий двигун.

Всі восьмициліндрові двигуни серій ЯМЗ-238, незалежно від наявності турбонаддуву мають однаковий об'єм (14,86 л), діаметр циліндра (130 мм) та хід поршня (140 мм) [18, 19].

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 зав'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) [20, 21].

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 :

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

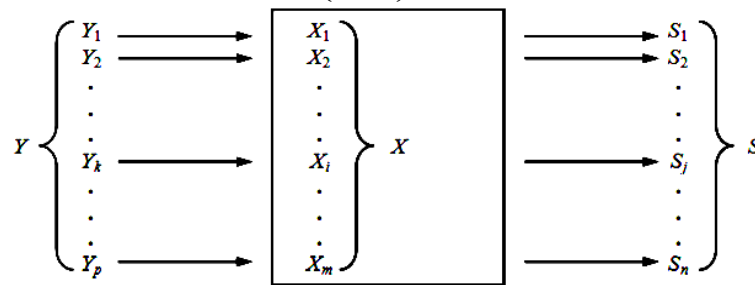


Рис. 1. Представлення об'єкта діагностування у вигляді «чорного ящика»

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

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

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.

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.



$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ S_2 = \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots\dots\dots \\ S_j = \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots\dots\dots \\ S_n = \varphi_n(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{array} \right. \quad (3)$$

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 [22-25].

З досвіду багаторічної експлуатації двигунів ЯМЗ-238 всіх модифікацій [18, 19] в табл. 1 представлена матриця діагностування їх вузлів і агрегатів.

В матриці (табл. 1) позначимо наступні несправності двигунів ЯМЗ-238: x_1 – стартер не прокручує колінчастий вал або обертає його дуже повільно (несправний стартер або акумуляторна батарея); x_2 – засмічені паливопроводи або забірник в паливному баку; x_3 – замерзання води в паливопроводах або на сітці забірника паливного бака; x_4 – загустіння палива в паливопроводах; x_5 – засмічення фільтруючих елементів паливних фільтрів; x_6 – неправильний кут випередження впорскування палива; x_7 – наявність повітря в паливній системі; x_8 – несправний паливопідкачуючий насос; x_9 – заїдання рейки паливного насоса високого тиску в «нульовій» подачі; x_{10} – ускладнене переміщення рейки паливного насоса високого тиску через загустіння масла; x_{11} – негерметичний перепускний клапан паливного насоса високого тиску; x_{12} – забруднення повітряних фільтрів; x_{13} – засмічення випускного тракту; x_{14} – важіль управління регулятором паливного насоса високого тиску не доходить до болта максимальних обертів або Важіль зупинки не доходить до крайнього робочого положення; x_{15} – нещільність прилягання клапанів газорозподілу; x_{16} – низький тиск повітря, що нагнітається; x_{17} – розрегулювання або засмічення форсунок; x_{18} – несправність клапанів паливопідкачуючого насоса; x_{19} – злам пружин штовхача паливного насоса високого тиску; x_{20} – злам пружин або негерметичність нагнітальних клапанів паливного насоса; x_{21} – знос поршневих кілець; x_{22} – раннє впорскування палива в циліндри; x_{23} – розрегульовані зазори в клапанному механізмі; x_{24} – ослаблене кріплення або дефект паливопроводу високого тиску; x_{25} – порушена рівномірність подачі палива секціями насоса високого тиску; x_{26} – незадовільна робота окремих форсунок; x_{27} – несправність регулятора числа обертів; x_{28} – забруднення фільтруючого елемента масляного фільтра; x_{29} – несправний манометр; x_{30} – засмічення забірника масляного насоса; x_{31} – засмічення або несправність редуційного або диференційного клапанів масляного насоса; x_{32} – негерметичність з'єднань маслопроводів; x_{33} – розрідження масла внаслідок попадання палива; x_{34} – збільшення зазорів в корінних і шатунних підшипниках колінчастого вала в результаті зносу або руйнування вкладишів; x_{35} – ослаблення натягу ремня приводу водяного насоса; x_{36} – знос ремня водяного насоса; x_{37} – порушення герметичності рідинного тракту системи охолодження; x_{38} – пошкодження прокладки пробки радіатора; x_{39} – несправності термостатів; x_{40} – забруднення радіатора; x_{41} – не вмикається вентилятор; x_{42} – несправність вмикача муфти вентилятора; x_{43} – дефект ущільнюючих кілець гільз циліндрів; x_{44} – руйнування ущільнюючої прокладки головки циліндрів; x_{45} – порушення герметичності рідинно-масляного теплообмінника; x_{46} – порушення герметичності ущільнюючої прокладки головки циліндрів пневмокомпресора; x_{47} – тертя ротора об нерухомі деталі турбокомпресора; x_{48} – проковзування приводних пасів генератора; x_{49} – несправність в проводці або контактних з'єднаннях генератора і регулятора; x_{50} – несправність генератора; x_{51} – несправність акумуляторної батареї; x_{52} – несправний регулятор напруги генератора; x_{53} – замикання клеми шунтового дроту



генератора і регулятора на масу; x_{54} – зношені або зруйновані деталі підшипника генератора; x_{55} – деформований вентилятор генератора; x_{56} – надмірний натяг або знос приводних пасів; x_{57} – дефект зубів шестірні стартера або вінця маховика (шестерня не входить в зачеплення); x_{58} – ослаблене кріплення стартера до двигуна; x_{59} – порушене регулювання реле стартера; x_{60} – несправний привід стартера; x_{61} – розрив електричного кола живлення факельних штифтових свічок через відсутність контакту в дротах або перегорання спіралей обох свічок; x_{62} – перегорання спіралі елемента накалювання в одній з факельних штифтових свічок; x_{63} – замикання спіралі елемента накалювання факельної штифтової свічки на штифт; x_{64} – недостатня частота обертання двигуна (менше 50 об/хв) через низьку температури мастила в двигуні або низьку температуру електроліту акумуляторних батарей, а також значною мірою їх розрядку; x_{65} – несправність в електричному ланцюзі; x_{66} – несправність в системі живлення.

Також в матриці (табл. 1) вводимо ознаки вище вказаних несправностей зчеплення: S_1 – двигун не запускається; S_2 – двигун не розвиває потужності; S_3 – стук в двигуні; S_4 – нестійка робота двигуна; S_5 – низький тиск масла в системі мащення; S_6 – підвищена температура рідини в системі охолодження; S_7 – в систему мащення потрапляє вода; S_8 – сторонній шум в турбокомпресорі; S_9 – показчик струму вказує на розрядний струм при номінальній частоті обертання колінчастого вала двигуна; S_{10} – надмірно великий зарядний струм; S_{11} – сторонній шум в генераторі; S_{12} – сторонній шум в стартері під час його роботи; S_{13} – стартер працює, але не повертає колінчастий вал двигуна; S_{14} – при ввімкненні електрофакельного пристрою в режимі «попереднього прогріву», стрілка амперметра на щитку приладів не відхиляється; S_{15} – при ввімкненні електрофакельного пристрою в режимі «попереднього прогріву», стрілка амперметра на щитку приладів показує майже вдвічі меншу силу струму розряджання у порівнянні з нормальною роботою електрофакельного пристрою; S_{16} – при ввімкненні електрофакельного пристрою в режимі «попереднього прогріву», стрілка амперметра на щитку приладів показує велику силу струму розряджання у порівнянні з нормальною роботою електрофакельного пристрою; S_{17} – під час перевірки роботи електрофакельного пристрою відсутній факел у впускному трубопроводі двигуна.

Таблиця 1

Матриця діагностування двигунів сімейства ЯМЗ-238

Несправність двигуна	Ознака несправності двигуна																
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
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_{65}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
x_{66}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

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 -ї 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 «+».

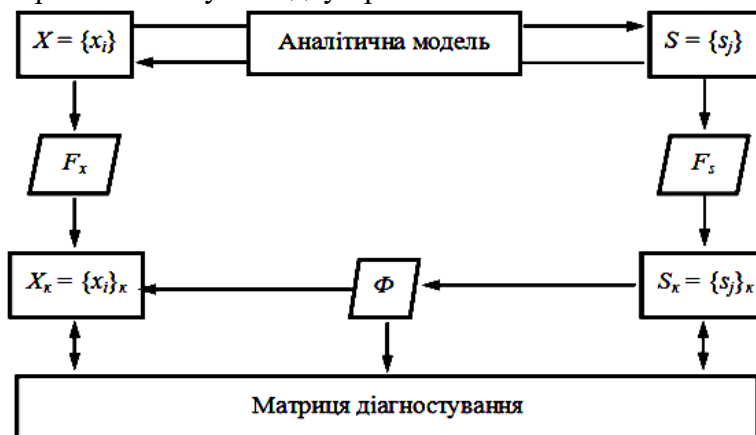


Рис. 2. Блок-схема синтезу матриці діагностування двигунів сімейства ЯМЗ-238:

$X = \{x_i\}$ – нескінченна кількість технічних станів об'єкта; $X_k = \{x_i\}_k$ – 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

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

Як впливає з цього визначення та табл. 1, S_1 істотно залежить тільки від $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11}; \\ S_2 = x_5 + x_6 + x_7 + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21}; \\ S_3 = x_{22} + x_{23}; \\ S_4 = x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27}; \\ S_5 = x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34}; \\ S_6 = x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{38} + x_{39} + x_{40} + x_{41} + x_{42}; \\ S_7 = x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46}; \\ S_8 = x_{47}; \\ S_9 = x_{48} + x_{49} + x_{50} + x_{51}; \\ S_{10} = x_{52} + x_{53}; \\ S_{11} = x_{54} + x_{55} + x_{56}; \\ S_{12} = x_{57} + x_{58} + x_{59}; \\ S_{13} = x_{57} + x_{60}; \\ S_{14} = x_{61}; \\ S_{15} = x_{62}; \\ S_{16} = x_{63}; \\ S_{17} = x_{64} + x_{65} + x_{66}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Залежність $S_1 = \varphi_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11})$ виражається в даному випадку в вигляді функції логічного додавання (диз'юнкція):

$$S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11}.$$

Відповідний аналіз інших ознак несправностей дозволяє записати систему рівнянь (3) для даної матриці діагностування двигунів типу ЯМЗ-238 у вигляді (7).

Всі послідовні перетворення, що призводять до синтезу моделі об'єкта діагностування у вигляді діагностичної матриці, наочно представлені на блок-схемі (див. рис. 2). 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 (табл. 1) розглянемо окремо один із рядків, наприклад, перший. З матриці видно, що наявність несправності x_5 викликає одночасно вихід ознак S_1 та S_2 з області їх допустимих значень. Значення інших діагностичних параметрів при наявності тільки несправності x_5 залишаються в межах норми. Значить x_5 є булевою функцією, в даному випадку кон'юнкція (або функцією логічного множення):

$$x_5 = S_1 S_2.$$

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

$$\begin{cases} x_1 = S_1; & x_2 = S_1; & x_3 = S_1; & x_4 = S_1; & x_5 = S_1 S_2; & x_6 = S_1 S_2; \\ x_7 = S_1 S_2; & x_8 = S_1; & x_9 = S_1; & x_{10} = S_1; & x_{11} = S_1; & x_{12} = S_2; \\ x_{13} = S_2; & x_{14} = S_2; & x_{15} = S_2; & x_{16} = S_2; & x_{17} = S_2; & x_{18} = S_2; \\ x_{19} = S_2; & x_{20} = S_2; & x_{21} = S_2; & x_{22} = S_3; & x_{23} = S_3; & x_{24} = S_4; \\ x_{25} = S_4; & x_{26} = S_4; & x_{27} = S_4; & x_{28} = S_5; & x_{29} = S_5; & x_{30} = S_5; \\ x_{31} = S_5; & x_{32} = S_5; & x_{33} = S_5; & x_{34} = S_5; & x_{35} = S_6; & x_{36} = S_6; \\ x_{37} = S_6; & x_{38} = S_6; & x_{39} = S_6; & x_{40} = S_6; & x_{41} = S_6; & x_{42} = S_6; \\ x_{43} = S_7; & x_{44} = S_7; & x_{45} = S_7; & x_{46} = S_7; & x_{47} = S_8; & x_{48} = S_9; \\ x_{49} = S_9; & x_{50} = S_9; & x_{51} = S_9; & x_{52} = S_{10}; & x_{53} = S_{10}; & x_{54} = S_{11}; \\ x_{55} = S_{11}; & x_{56} = S_{11}; & x_{57} = S_{12} S_{13}; & x_{58} = S_{12}; & x_{59} = S_{12}; & x_{60} = S_{13}; \\ x_{61} = S_{14}; & x_{62} = S_{15}; & x_{63} = S_{16}; & x_{64} = S_{17}; & x_{65} = S_{17}; & x_{66} = S_{17}. \end{cases} \quad (9)$$

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

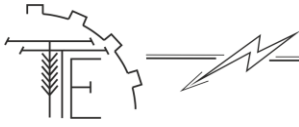
- шляхом відповідних вимірювань і перетворень (5) встановлюються ознаки всіх несправностей S_1, S_2, \dots, S_n ;
- значення діагностичних параметрів підставляються в систему булевих функцій (8);
- обчислюються значення всіх булевих функцій несправностей x_i ($i = 1, 2, \dots, m$) причому, якщо $x_i = 1$, 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:

$$F_p = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{66}. \quad (10)$$

Повертаючись до блок-схеми синтезу матриці діагностування (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.



5. Висновки та перспективи подальших досліджень

1. В ході аналізу останніх досліджень і публікацій з представленої теми встановлено, що конкретних математичних залежностей визначення технічного стану двигунів сімейства ЯМЗ-238 не виявлено.

2. Для двигунів сімейства ЯМЗ-238 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: $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_8 = x_9 = x_{10} = x_{11} = S_1$; $x_5 = x_6 = x_7 = S_1 S_2$; $x_{12} = x_{13} = x_{14} = x_{15} = x_{16} = x_{17} = x_{18} = x_{19} = x_{20} = x_{21} = S_2$; $x_{22} = x_{23} = S_3$; $x_{24} = x_{25} = x_{26} = x_{27} = S_4$; $x_{28} = x_{29} = x_{30} = x_{31} = x_{32} = x_{33} = x_{34} = S_5$; $x_{35} = x_{36} = x_{37} = x_{38} = x_{39} = x_{40} = x_{41} = x_{42} = S_6$; $x_{43} = x_{44} = x_{45} = x_{46} = S_7$; $x_{48} = x_{49} = x_{50} = x_{51} = S_9$; $x_{52} = x_{53} = S_{10}$; $x_{64} = x_{65} = x_{66} = S_{17}$.

Таким чином, перелік діагностичних параметрів двигунів сімейства ЯМЗ-238 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 двигунів сімейства ЯМЗ-238 вимагає введення нових додаткових діагностичних параметрів, що є предметом подальших наукових досліджень даного напрямку.

Список використаних джерел

1. Соснин Д. А. Автотроника. Электрооборудование и системы бортовой автоматики современных легковых автомобилей. М.: СОЛОН-Пресс, 2008. 272 с.
2. Komorska I. Diagnostic-Oriented Vibroacoustic Model of the Reciprocating Engine. *Solid State Phenomena*. 2012. Vol. 180. P. 214–221.
3. Ждановский Н. С., Николаенко А. В. Надежность и долговечность автотракторных дизелей. Ленинград: Колос, 1981. 295 с.
4. Астахов И. В. Физические основы процесса впрыска топлива в дизелях. *Труды МАДИ. Автотракторные двигатели внутреннего сгорания*. 1979. С. 37–52.
5. Баширов Р. М. Оптимизация состава машинно-тракторного парка и распределения агрегатов по видам работ. Уфа: Издательство БГАУ, 2000. 113 с.
6. Бышов Н. В., Борычев С. Н., Аникин Н. В. и др. Перспективы технической эксплуатации мобильных средств сельскохозяйственного производства. Рязань: Издательство РГАТУ, 2015. 191 с.
7. Ждановский Н. С., Аллилуев В. А., Николаенко А. В. и др. Диагностика автотракторных двигателей. Ленинград: Колос, 1977. 264 с.
8. Загородских В. П., Хатько В. В. Ремонт и регулирование топливной аппаратуры автотракторных двигателей. Москва: Россельхозиздат, 1986. 139 с.
9. Кокорев Г. Д. Повышение эффективности системы технической эксплуатации автомобилей в сельском хозяйстве на основе инженерно-кибернетического подхода : дис. ... докт. техн. наук : 05.20.03 / ФГБОУ ВПО «РГАУ им. П. А. Костычева». Рязань, 2014. 475 с.
10. Николаенко А. В., Хватов В. Н. Повышение эффективности использования дизелей в сельском хозяйстве. Ленинград: Агропромиздат. Ленинградское отд-ние, 1989. 191 с.
11. Успенский И. А., Сеницин П. С., Кокорев Г. Д. Основные принципы диагностирования МСХТ с использованием современного диагностического оборудования. *Сборник научных работ студентов РГАТУ. Материалы научно-практической конференции*. 2011. Т. 1. С. 263-269.
12. Глазунов Л. П., Смирнов А. Н. Проектирование технических систем диагностирования. Ленинград: Энергоатомиздат, 1982. 168 с.
13. Биргер И. А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. 240 с.
14. Карибский В. В., Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Техническая диагностика объектов контроля. М.: Энергия, 1967. 80 с.
15. Никифоров С. Н. Теория параллельного диагностирования. Дискретные объекты. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 144 с.
16. Мирошников Л. В., Болдин А. П., Пал В. И. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях. Москва: Транспорт, 1977. 264 с.
17. Сергеев А. Г. Точность и достоверность диагностики автомобиля. Москва: Транспорт, 1980. 191 с.
18. Руководство по ремонту на двигатели ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 всех комплектаций и исполнений. Ярославль: ОАО «Автодизель», 2014. 287 с.
19. Двигатели ЯМЗ-236М2, ЯМЗ-238М2 (236-3902150-Б РЭ). Ярославль: ОАО «Автодизель», 2010. 172 с.
20. Ананьин А. Д., Михлин В. М., Габитов И. И. Диагностика и техническое обслуживание машин.



- Москва: Издательский центр «Академия», 2008. 432 с.
21. Сырбаков А. П., Корчуганова М.А. Диагностика и техническое обслуживание. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 220 с.
 22. 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, No.1. P. 41–47.
 23. 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.
 24. Борисюк Д. В. Математична модель коробки перемикаччя передач типу ЯМЗ-239 як об'єкта діагностування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. Випуск 3 (156). С. 93-104.
 25. 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. 284 с.

References

- [1] Sosnin, D. A. (2008). *Avtotronika. Elektrooborudovaniye i sistemy bortovoy avtomatiki sovremennykh legkovykh avtomobiley* [Autotronics. Electrical equipment and on-board automation systems for modern passenger cars]. Moscow [in Russian].
- [2] Komorska, I. (2012). [Diagnostic-Oriented Vibroacoustic Model of the Reciprocating Engine. *Solid State Phenomena*]. Kapellweg [in English].
- [3] Zhdanovskiy, N. S., Nikolayenko, A. V. (1981). *Nadezhnost' i dolgovechnost' avtotraktornykh dizeley*. [Reliability and durability of tractor diesels]. Leningrad [in Russian].
- [4] Astakhov, I. V. (1979). *Fizicheskiye osnovy protsessa vpryska topliva v dizelyakh*. [Physical bases of process of fuel injection in diesel engines]. [in Russian].
- [5] Bashirov, P. M. (2000). *Optimizatsiya sostava mashinno-traktornogo parka i raspredeleniya agregatov po vidam rabot*. [Optimization of the composition of the machine and tractor fleet and the distribution of units by type of work.]. Ufa [in Russian].
- [6] Byshov, N. V., Borychev, S. N., Anikin, N. V. i dr. (2015). *Perspektivy tekhnicheskoy ekspluatatsii mobil'nykh sredstv sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva*. [Prospects for the technical operation of mobile means of agricultural production]. Ryazan [in Russian].
- [7] Zhdanovskiy, N. S., Alliluyev, V. A., Nikolayenko, A. V. i dr. (1977). *Diagnostika avtotraktornykh dvigateley*. [Diagnostics of automotive engines]. Leningrad [in Russian].
- [8] Zagorodskikh, V. P., Khat'ko, V. V. (1986). *Remont i regulirovaniye toplivnoy apparatury avtotraktornykh dvigateley*. [Repair and regulation of fuel equipment of automotive engines]. Moscow [in Russian].
- [9] Kokorev, G. D. (2014). *Povysheniye effektivnosti sistemy tekhnicheskoy ekspluatatsii avtomobiley v sel'skom khozyaystve na osnove inzhenerno-kiberneticheskogo podkhoda*. [Improving the efficiency of the technical operation of vehicles in agriculture based on the engineering-cybernetic approach]. Ryazan [in Russian].
- [10] Nikolayenko, A. B., Khvatov, V. N. (1989). *Povysheniye effektivnosti ispol'zovaniya dizeley v sel'skom khozyaystve*. [Improving the efficiency of the use of diesel engines in agriculture]. Leningrad [in Russian].
- [11] Uspenskiy, I. A., Sinitsin, P. S., Kokorev, G. D. (2011). *Osnovnyye printsipy diagnostirovaniya MSKHT s ispol'zovaniyem sovremennogo diagnosticheskogo oborudovaniya*. [Basic principles of diagnosing MSCT using modern diagnostic equipment]. [in Russian].
- [12] Glazunov, L. P., Smirnov, A. N. (1982). *Proyektirovaniye tekhnicheskikh sistem diagnostirovaniya*. [Design of technical diagnostic systems]. Leningrad [in Russian].
- [13] Birger, I. A. (1978). *Tekhnicheskaya diagnostika*. [Technical diagnostics]. Moscow [in Russian].
- [14] Karibskiy, V. V., Parkhomenko, P. P., Sogomonyan, Ye. S. (1967). *Tekhnicheskaya diagnostika obyektov kontrolya*. [Technical diagnostics of control objects]. Moscow [in Russian].
- [15] Nikiforov, S. N. (2020). *Teoriya parallel'nogo diagnostirovaniya. Diskretnyye obyekty*. [The theory of parallel diagnostics. Discrete objects]. Sank-Petersburg [in Russian].
- [16] Miroshnikov, L. V., Boldin, A. P., Pal, V. I. (1977). *Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobiley na avtotransportnykh predpriyatiyakh*. [Diagnostics of the technical condition of vehicles at motor transport enterprises]. Moscow [in Russian].
- [17] Sergeev, A. G. (1980). *Tochnost i dostovernosti diagnostiki avtomobilya*. [Accuracy and reliability of vehicle diagnostics]. Moscow [in Russian].
- [18] *Rukovodstvo po remontu na dvigateli YAMZ-236 i YAMZ-238 vseh komplektatsiy i ispolneniy*. [Repair manual for engines YaMZ-236 and YaMZ-238 of all configurations and versions]. (2014). Yaroslavl [in Russian].
- [19] *Dvigateli YAMZ-236M2, YAMZ-238M2 (236-3902150-B RE)*. [Engines YaMZ-236M2, YaMZ-238M2 (236-3902150-B RE)]. (2010). Yaroslavl [in Russian].



- [20] Anan'in, A. D., Mikhlin, V. M., Gabitov, I. I. (2008). *Diagnostika i tekhnicheskoye obsluzhivaniye mashin*. [Diagnostics and maintenance of machines]. Moscow [in Russian].
- [21] Borysiuk, D. V., Tverdokhlib, I. V., Polievoda, Y. A. (2013). *Osoblyvosti vibrodiahnostyky nyzkoobertovykh pidshypanykiv kochennia*. [Features of vibration diagnostics of low-speed rolling bearings]. Vinnytsia [in Ukrainian].
- [22] Borysiuk, D., Spirin, A., Trukhanska, O., Shvets, L., Zelinskyy, V. (2017). Mathematical model of a wheeled tractor steering axle as an object of diagnostics. [in Polish].
- [23] Borisyuk, D. V. (2021). *Matematichna model zcheplennya avtomobilya Volkswagen Polo Sedan yak ob'ekta diagnostuvannya*. [Mathematical model of the clutch of the Volkswagen Polo Sedan as an object of diagnosis]. Vinnytsia [in Ukrainian].
- [24] Borisyuk, D. V. (2021). *Matematichna model korobki peremikannya peredach tipu YAMZ-239 yak ob'ekta diagnostuvannya*. [Mathematical model of the gearbox type YaMZ-239 as an object of diagnosis]. Vinnytsia [in Ukrainian].
- [25] Borisyuk, D. V. (2020). *Vibir ta obgruntuvannya parametriv vibrodiagnostuvannya kerovanikh mostiv kolisnykh traktoriv*. [Selection and substantiation of vibration diagnostics parameters of controlled axles of wheeled tractors]. Zhytomyr [in Ukrainian].

MATHEMATICAL MODEL OF AUTOMATION OF THE DIAGNOSIS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF THE YAMZ-238 FAMILY

Constructive improvement of mobile energy means, in particular their main unit - the internal combustion engine, is directed on: maintenance of differentiation of size of parameters of functioning of mechanisms of systems depending on variability of conditions and modes of operation of cars; increase of technical resource at use of cars on purpose in the set operating conditions.

The existing methods and tools for diagnosing vehicle engines do not fully determine their current technical condition, which requires the development of mathematical models to automate the process of diagnosing their components and parts was found in the analysis of literature sources.

The object of diagnosis is a diesel internal combustion engine of the YaMZ-238 family, which is part of the power unit of most vehicles.

Mathematical model of automation of the process of diagnosing internal combustion engines of the YaMZ-238 family is presents in the article.

Replacing real technical devices with their idealized models allows the widespread use of various mathematical methods. In this case, the internal combustion engine of the YaMZ-238 family, as the object of diagnosis, is presented in the form of a «black box», the input and output parameters of which have a finite set of values. In general, the mathematical model is a system of functional relationships between each diagnostic signal and structural parameters.

For internal combustion engines of the YaMZ-238 family, a diagnostic matrix has been compiled, which includes a list of faults and signs of faults.

It is determined that the process of diagnosis based on the model of the diagnostic object is possible if the inverse transformation of the number of signs of malfunctions into the number of structural parameters (malfunctions) of the object was unambiguous.

The proposed mathematical model of automation of the process of diagnosing internal combustion engines of the family YaMZ-238 will detect faults of components and parts depending on their characteristics.

Keywords: *mathematical model, diagnosing, internal combustion engine, diagnosing matrix, block diagram, malfunction, fault sign, Boolean function.*

F. 10. Fig. 2. Tabl. 1. Ref. 25.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ СЕМЕЙСТВА ЯМЗ-238

Конструктивное усовершенствование мобильных энергетических средств, в частности их основного агрегата – двигателя внутреннего сгорания, направленное на: обеспечение дифференциации величины параметров функционирования механизмов систем в зависимости от изменчивости условий и режимов эксплуатации машин; повышение технического ресурса при использовании машин по назначению в заданных условиях эксплуатации.

При анализе литературных источников было установлено, что существующие методы и средства диагностирования двигателей транспортных средств не в полной мере позволяют определять их текущее техническое состояние, требующее разработки математических моделей автоматизации процесса диагностирования их узлов и деталей.

В качестве объекта диагностирования избран дизельный двигатель внутреннего сгорания семейства ЯМЗ-238, который входит в состав силового агрегата большинства транспортных средств.



В статье представлено математическую модель автоматизации процесса диагностирования двигателей внутреннего сгорания семейства ЯМЗ-238.

Замена реальных технических устройств их идеализированными моделями позволяет широко применять различные математические методы. В данном случае двигатель внутреннего сгорания семейства ЯМЗ-238, как объект диагностирования, представлено в виде «черного ящика», входные и выходные параметры которого имеют конечное множество значений. В общем виде математическая модель представляет собой систему функциональных зависимостей между каждым диагностическим сигналом и структурными параметрами.

Для двигателей внутреннего сгорания семейства ЯМЗ-238 составлена матрица диагностирования, которая включает перечень неисправностей и признаков неисправностей.

Определено, что процесс постановки диагноза на основе модели объекта диагностирования возможен, если обратное преобразование количества признаков неисправностей в число структурных параметров (неисправностей) объекта было однозначным.

Предложенная математическая модель автоматизации процесса диагностирования двигателей внутреннего сгорания семейства ЯМЗ-238 позволит выявить неисправности узлов и деталей в зависимости от их признаков.

Ключевые слова: математическая модель, диагностирование, двигатель внутреннего сгорания, матрица диагностирования, блок-схема, неисправность, признак неисправности, булева функция.

Ф. 10. Рис. 2. Табл. 1. Лит. 25.

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>).

Зелінський Вячеслав Йосипович – асистент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, вул. Воїнів-Інтернаціоналістів, 7, ауд. 3222, e-mail: zelinskiy.slava@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7785-2629>).

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>).

Полєвода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, 21008, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Борисюк Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автомобилей и транспортного менеджмента Винницкого национального технического университета (21021, г. Винница, ул. Воинов-Интернационалистов, 7, ауд. 3222, e-mail: bddv@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8572-6959>).

Зелинский Вячеслав Иосифович – ассистент кафедры автомобилей и транспортного менеджмента Винницкого национального технического университета (21021, г. Винница, ул. Воинов-Интернационалистов, 7, ауд. 3222, e-mail: zelinskiy.slava@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7785-2629>).

Твердохлеб Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (21008, г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1350-3232>).

Полевода Юрий Аликович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств Винницкого национального аграрного университета (21008, г. Винница, ул. Солнечная, 3, 21008, email: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Dmytro Borysiuk – Candidate of Technical Sciences (Ph.D in Eng.), 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>).

Viacheslav Zelinskiy – Assistant of the department of automobiles and transport management of Vinnytsia National Technical University (21021, Vinnytsia, Voinov-Internationalistov st., 7, room 3222, e-mail: zelinskiy.slava@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7785-2629>).

Igor Tverdokhlib – Candidate of Technical Sciences (Ph.D. in Eng.), associate professor of the department of general technical disciplines and occupational safety, Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinnytsia, st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1350-3232>).

Yurii Polievoda – Candidate of Technical Sciences (Ph.D. in Eng.), associate professor of the department of technological processes and equipment for processing and food production, Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinnytsia, st. Sonyachna, 3, 21008, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).