

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ



МОЛОДАН АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 629.083+629.431

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ І
ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ КОЛІСНИХ МАШИН
В РЕЖИМІ ВІДКЛЮЧЕННЯ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРІВ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Полянський Олександр Сергійович,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет, професор кафедри
технології машинобудування і ремонту машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Грицук Ігор Валерійович,
Херсонська державна морська академія, професор
кафедри експлуатації суднових енергетичних
установок;

доктор технічних наук, професор
Калінін Євген Іванович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
завідувач кафедри експлуатації, надійності,
міцності та будівництва імені В.Я. Аніловича;

доктор технічних наук, професор
Лузан Сергій Олексійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», завідувач
кафедри зварювання.

Захист відбудеться «12» травня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002.

Автореферат розісланий « 9 » квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.П. Смирнов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин є однією з найважливіших умов їхнього ефективного використання. Під час експлуатації цих машин, як показують численні дослідження, 30-75% відмов припадає на автотракторний двигун (АТД). Тому забезпечення працездатного стану АТД – це своєчасне виявлення й попередження відмов, що виникають у процесі експлуатації. Зростання енергонасиченості, вдосконалення й ускладнення конструкцій колісних машин обумовлюється високими вимогами до ефективності їх роботи на різних режимах навантаження, раціонального використання потужності автотракторних двигунів й зниження витрати палива.

Одним із заходів забезпечення динамічних властивостей колісних машин та потужності на їх ведучих колесах з одночасним зниженням витрати палива є робота автотракторного двигуна в режимі відключення частини циліндрів. Цій проблемі приділено увагу недостатньо, відсутні дослідження процесу навантаження і методу керування системами АТД, які впливають на надійність і функціональну стабільність колісної машини, та методи діагностування.

Робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми забезпечення надійності та функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів. Ефективним методом подальшого підвищення паливної економічності АТД при відключенні частини циліндрів на режимах малих навантажень і обертів може стати перехід на керовані нейронними мережами системи паливopодачі, які мають зворотній зв'язок з використанням датчиків штатної бортової системи. Застосування штучної нейронної мережі також дозволяє покращити новітні технології контролю і діагностування технічного стану елементів колісних машин, зокрема двигунів внутрішнього згоряння.

Поєднання методу відключення частини циліндрів і новітніх технологій контролю та діагностування технічного стану елементів колісних машин дозволить забезпечити необхідний рівень технічних характеристик, що і визначає актуальність і перспективність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у рамках тематики науково-дослідної роботи кафедри технології машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) у відповідності до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» № 2623-14 від 05.12.2012 р. і постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Державної програми підвищення безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2020 року» №435 від 25.04.2018 р. і постанови Національної Ради з питань безпеки життєдіяльності населення №3 від 25 грудня 1997 р. «Про відповідність вимогам охорони праці машин, транспортних засобів, обладнання, які виготовляються в Україні»; «Транспортної стратегії України на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174-р.; згідно з планом науково-дослідних робіт (НДР) ХНАДУ: «Аналіз, розробка та оптимізація конструктивних та

технологічних методів підвищення ресурсу автотранспортних систем при виробництві та ремонті» №0115u001609 на 2015-2016 роки, при виконанні науково-дослідної роботи «Енергозберігаючі маловитратні технології створення та ремонту гібридних транспортних засобів різного призначення» (№ 08-53-19, держ. реєстр №0119u001298) на 2019-2020 роки.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є забезпечення надійності та функціональної стабільності колісних машин в умовах режиму відключення частини циліндрів двигуна та діагностування з використанням штучної нейронної мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести теоретичні дослідження впливу відключення частини циліндрів на характеристики потужності автотракторного двигуна;
- провести експериментальні дослідження визначення зміни потужності на колесах машини при відключенні одного або декількох циліндрів двигуна;
- обґрунтувати критерії і розробити метод прогнозування та оцінювання надійності автотракторного двигуна при відключенні частини циліндрів;
- провести теоретичні й експериментальні дослідження впливу робочих процесів автотракторного двигуна на динамічні властивості колісних машин при відключенні частини циліндрів;
- удосконалити методи контролю і діагностування технічного стану колісних машин для забезпечення надійності і функціональної стабільності їх тягових властивостей колісних машин з використанням штучної нейронної мережі.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси, що протікають у моторно-трансмісійних установках колісних машин в умовах роботи з відключенням частини циліндрів.

Предмет дослідження – методи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в умовах роботи з відключенням частини циліндрів.

Методи дослідження. Методологічною основою дисертаційної роботи є використання системного підходу та раціонального поєднання теоретичних й експериментальних досліджень. При вирішенні поставлених у дисертаційній роботі проблем використовувалися методи теорії ймовірності та математичної статистики, комп'ютерного моделювання, а також теорії термодинаміки, газодинаміки і теплообміну.

Експериментальні дослідження виконувалися із застосуванням різних існуючих і розроблених методів, з використанням сучасної виміральної та реєструючої апаратури, використанням мобільного реєстраційно-вимірального комплексу, адаптованого для оцінювання показників динамічних властивостей. Застосовано методи натурних випробувань, парціальних прискорень, метод електричного вимірювання неелектричних величин. Адекватність розроблених моделей оцінювалася із застосуванням теорії похибок і кореляційного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в узагальненні відомих та розробці нових методів діагностування та забезпечення надійності і функціональної стабільності засобів транспорту в режимі відключення частини циліндрів двигуна, що дозволило визначити шляхи їх покращення.

При цьому *вперше*:

- визначено додаткові втрати енергії двигуна на рух колісної машини, обумовлені збільшенням нерівномірного крутильного моменту при відключенні частини циліндрів;

- визначена динаміка зміни ефективної потужності двигуна при розгоні колісної машини з відключенням частини циліндрів;

- встановлено, що при відключенні частини циліндрів, економія палива на холостому ходу й малих навантаженнях визначається залежністю індикаторного коефіцієнта корисної дії від зміни навантаження.

Удосконалено метод оцінювання технічного стану двигуна колісної машини, який на відміну від відомих методів, дозволяє визначити можливість відключення раціональної кількості циліндрів з використанням штучної нейронної мережі.

Отримали подальший розвиток:

- метод визначення додаткових втрат енергії двигуна, що обумовлено накладенням вимушених та власних коливань моторно-трансмісійних установок колісних машин за допомогою функції Меандру в напрямі використання гармонійного моменту, який відрізняється від відомих використанням рядів Фур'є;

- метод оцінювання надійності базових деталей автотракторного двигуна (колінчастий вал, блок циліндрів) у напрямку оцінювання впливу збільшення нерівномірності крутильного моменту при відключенні частини циліндрів, що, на відміну від відомих, урахує прийняття мотивованих рішень для управління ризиками експлуатації автотракторного двигуна при відключенні частини циліндрів;

- метод визначення потужності механічних втрат енергії на насосні ходи поршня в напрямку оцінювання впливу підвищення нерівномірності крутильного моменту при відключенні частини циліндрів, який, на відміну від відомих, урахує зміну температурного режиму у відключеному циліндрі.

Практичне значення одержаних результатів. З використанням результатів теоретичних і експериментальних досліджень були розроблені та прийняті до впровадження, а саме:

- метод підвищення енергетичної ефективності АТД колісної машини шляхом відключення частини його циліндрів;

- метод обґрунтування допустимої кількості відключених циліндрів, що може приводити не тільки до зниження потужності АТД, але й до зниження надійності його роботи;

- метод визначення додаткових витрат енергії, що зумовлено відключенням частини циліндрів АТД;

- метод вимірювання потужності, що розвивається окремими циліндрами шляхом здійснення розгону АТД для визначення повної потужності, з подальшим відключенням циліндру, потужність якого потрібно вимірювати, і повторенням розгону;

- удосконалена методика визначення ККД колісної машини від миттєвої реалізованої потужності АТД шляхом обробки записів бортового реєстратора параметрів руху.

Запропоновано систему відключення паливоподачі, яка реалізує вдосконалені процеси й алгоритми відключення циліндрів АТД і враховує моменти зниження тиску в лініях високого тиску палива, має контроль стану підтискних пружин електромагнітних клапанів, що встановлені поза межами порожнин високого тиску, що дозволило застосовувати менш потужні електромагніти та пружини.

Основні положення дисертаційної роботи прийняті до впровадження на наступних підприємствах та в організаціях: ДП «ХЗСМ», «Харківському автомобільному заводі», ПАТ «АвтоКрАЗ», АТ «Харківському тракторному заводі», ТОВ «Спецбудмаш», ННЦ «Інституті механізації та електрифікації сільського господарства».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладені у роботах [1-47]. Роботи [6, 11, 13–16, 18, 19, 26, 30, 33, 35] опубліковані без співавторів. У колективній монографії [1] автору належить розділ 5 «Зміна техніко-економічних та енергетичних параметрів автотракторного двигуна колісної машини при відключенні циліндрів». У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: обґрунтування ефективності обсягу рециклінгу та рівня повторного використання деталей та агрегатів [2], метод оцінювання технічного стану циліндро-поршневої групи шляхом обґрунтування нормативів діагностичних параметрів [3, 7, 24], метод визначення взаємозв'язків потужнісних і паливно-економічних показників колісних машин і двигуна при відключенні частини його циліндрів [4, 9, 38], дослідження з покращення експлуатаційних показників двигуна в режимі роботи без навантаження шляхом обґрунтування кількості відключення циліндрів та визначення енергетичних параметрів його роботи [5, 43], застосування моделі багатокомпонентного складного руху, що дозволило визначити напрямок підвищення енергетичної ефективності автомобіля, яким є зниження амплітуд гармонік сил, прикладених до ведучих коліс [8], метод визначення відносної додаткової витрати палива при відключенні циліндрів на багатоциліндрових двигунах [10], метод обчислення параметрів кожного з експлуатаційних режимів по різній кількості відключених циліндрів [12], методика розрахунку еквівалентних напружень у тріщинах і залишкового напрацювання деталей двигуна з відключеними циліндрами [17, 37, 42, 46], узагальнення теоретичних результатів, пов'язаних з вивченням динаміки трансмісії, що впливають на додаткові втрати палива в автомобілі при його експлуатації в повнопривідному режимі [20], метод оцінювання працездатності рульового управління, що враховує особливості конструкції колісних шарнірно-зчленованих машин [21, 27], метод розрахунку механічних втрат, який дозволяє з точністю близько 10% визначати вплив кількості відключених циліндрів на ефективну потужність двигуна, потужність механічних втрат і механічний коефіцієнт корисної дії (ККД) [22], результати системного моделювання, що підтвердили ефективність удосконаленого методу вирішення завдань порівняння з технічним рівнем аналогічної автотракторної техніки при її експлуатації [23, 34], метод визначення виконаної роботи двигуном із застосуванням моделі складного руху автомобіля, що дозволяє в поєднанні з відповідним

вимірювальним комплексом здійснювати оцінювання напрацювання безпосередньо в процесі експлуатації автомобіля [25], підходи до визначення складності додаткових функцій мобільного комунікаційного пристрою [28], визначення похибки вимірювання прискорення автомобіля акселерометром під час руху дорогою з ухилом [29], визначення роботи автотракторного двигуна при широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів роботи [31], метод раціонального використання потужності двигуна при відключенні циліндрів [32, 36], ефективність і застосування нейронно-мережових моделей у системах діагностики технічного стану двигунів [39–41, 44], алгоритм оцінювання напрацювання деталей двигуна до відмови по втомній міцності при відключенні частини циліндрів [45]. У патенті [47] автору належить схема відключення циліндрів за допомогою електромагнітних клапанів.

Апробація результатів роботи. Основні результати теоретичних й експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на міжнародній науково-практичній і науково-методичній конференції, присвяченій 85-річчю кафедри автомобілів і 100-річчю з Дня народження професора А.Б. Гредескула, «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців» (Харків, ХНАДУ, 2016 р.); науково-практичній конференції «Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення сил охорони правопорядку» (Харків, НАНГУ, 2016 р.); науково-методичній конференції «Особливості викладання фахових дисциплін технічних спеціальностей – виклики часу та перспективи» (Харків, ХНАДУ, 2017 р.); 13-му міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2017 р.); чотирнадцятій науковій конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (Харків, ХНУПС імені Івана Кожедуба, 2018 р.); всеукраїнському науково-практичному семінарі «Наукові досягнення в галузі автомобільного транспорту» (Харків, ХНАДУ, 2018 р.); II всеукраїнській науково-технічній конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (Полтава, ПНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2018 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту» (Харків, ХНАДУ, 2018 р.); науково-практичній конференції «Технічне та тилове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи» (Харків, НАНГУ, 2019 р.); всеукраїнському науково-практичному семінарі «Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів» (Харків, ХНАДУ, 2019 р.); міжнародній науково-методичній конференції, присвяченій пам'яті академіка В.Я. Аніловича «Проблеми надійності машин» (Харків, ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019 р.); XII міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Вінниця, ВНТУ, 2019 р.); IV міжнародній науково-практичній конференції «Безпека на транспорті – основа ефективної інфраструктури: проблеми та перспективи» (Харків, ХНАДУ, 2019 р.); всеукраїнських науково-практичних конференціях «Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та

правоохоронних органів» (Харків, НАНГУ, 2018 р., 2020 р.); XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI науково-технічних конференціях з міжнародною участю «Транспорт, екологія – устойчиво развитие» (Варна, ТУ, 2016 р., 2017 р., 2018 р., 2019 р., 2020 р.); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ХНАДУ (2016–2020 рр.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 47 наукових працях, у тому числі: 1 монографії; 23 статтях у наукових фахових виданнях України та інших держав, у тому числі 4 статтях у виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз (2 статті до бази Web of Science Core Collection та 2 статті до бази Scopus); 17 тезах у збірниках доповідей на наукових конференціях; отримано 1 патент України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел та п'яти додатків. Повний обсяг дисертації складає 387 сторінок, у тому числі обсяг основного тексту – 271 сторінка і 2 сторінки, площа яких повністю зайнята рисунками та таблицями. Робота ілюстрована 81 рисунком, наведено 17 таблиць. Перелік використаних джерел містить 312 найменувань на 38 сторінках, додатки розміщені на 42 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи; обґрунтовано актуальність теми; сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження; описано застосовані методи дослідження та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; надано інформацію про апробацію та публікацію результатів дисертаційних досліджень.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел, що стосуються досліджуваної в дисертаційній роботі проблеми. Виконано огляд існуючих досліджень з функціональної стабільності, її зв'язок з експлуатаційними властивостями колісних машин та впливу відключення циліндрів на енергоефективність експлуатації автотракторних двигунів колісних машин.

Проаналізовано існуючі методи визначення корисної потужності автотракторного двигуна колісної машини, вплив факторів на її використання та методи оцінювання падіння потужності на ведучих колесах колісної машини в процесі експлуатації. Розглянуто методи покращення функціональної стабільності експлуатаційних властивостей колісних машин у процесі експлуатації. Проаналізовано вплив відключення циліндрів на енергоефективність експлуатації автотракторних двигунів колісних машин й існуючі засоби відключення циліндрів. Виявлено, що у відомих дослідженнях не розглянуто вплив нерівномірності крутильного моменту, прикладеного до колеса, на нерівномірність роботи автотракторного двигуна при відключенні частини циліндрів. Проведено аналіз можливості застосування технології нейронних мереж для діагностики технічного

стану автотракторних двигунів при відключенні частини циліндрів. Виявлено, що існуючі засоби, які дозволяють здійснити ефективно відключення циліндрів і циклів, потребують вдосконалення.

Встановлено, що, в існуючих дослідженнях з теорії функціональної стабільності, недостатню увагу приділено саме функціональній стабільності колісних машин в умовах режиму відключення частини циліндрів автотракторного двигуна шляхом автоматичного регулювання циклової подачі палива. У системах відключення частини циліндрів двигунів ще й досі не знайшли широкого застосування сучасні інтелектуальні технології, що включають нейронні мережі, нечітку логіку, експертні системи. Встановлено, що потребує дослідження питання впливу вібрації елементів моторно-трансмісійної установки при відключенні частини циліндрів АТД на надійність колісної машини. За результатами першого розділу сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі наведено основні теоретичні положення впливу відключення частини циліндрів на характеристики потужності автотракторного двигуна. Обґрунтовано, що необхідність підвищення енергоефективності роботи двигуна в широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів сприяє як пошуку нових технічних рішень, так і розвитку раніше відомих.

Співвідношення додаткових витрат енергії (викликаних нерівномірністю крутильного моменту АТД) між варіантом з усіма працюючими циліндрами й варіантом відключенням частини з них визначатиметься за формулою

$$k_w = \frac{\Delta W''}{\Delta W'} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta i_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}}} \left(1 - \frac{\frac{\Delta i_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}}}{1 + \frac{180,5}{i'_{\text{ц}}}} \right), \quad (1)$$

де $\Delta W'$, $\Delta W''$ – додаткові витрати енергії двигуна при всіх працюючих циліндрах і відключення частини з них; $\Delta i_{\text{ц}}$ – кількість відключених циліндрів; $i'_{\text{ц}}$ – число всіх циліндрів АТД; 180,5 – постійна після перетворення при застосуванні коефіцієнта нерівномірності крутильного моменту АТД.

Зміна додаткових витрат енергії двигуна

$$\delta \Delta W_1 = \Delta W'' - \Delta W' = \Delta W' \left(\frac{\Delta W''}{\Delta W'} - 1 \right). \quad (2)$$

Величина $\Delta W'$ визначена як

$$\begin{aligned} \Delta W' &= \frac{A_p}{\pi} \cdot S = \frac{A_{mi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{тр} \cdot u_k \cdot u_0}{\pi \cdot r_\delta} \cdot S = \\ &= \frac{\overline{M}_i \cdot \left[0,08 + \frac{14,44}{i'_u} \right] \cdot \eta_m \cdot \eta_{тр} \cdot u_k \cdot u_0}{2 \cdot \pi \cdot r_\delta} \cdot S, \end{aligned} \quad (3)$$

де A_p – амплітуда коливань тягової сили; A_{mi} – амплітуда коливань індикаторного крутильного моменту; \overline{M}_i – середній індикаторний крутний момент АТД; η_m , $\eta_{тр}$ – механічний ККД АТД і ККД трансмісії; u_k , u_0 – передаточні числа коробки передач і головної передачі; r_δ – динамічний радіус колеса; S – пробіг автомобіля.

Після підстановки виразу (3) у рівняння (2), отримаємо

$$\delta \Delta W_1 = \frac{\overline{M}_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{тр} \cdot u_k \cdot u_0}{2 \cdot \pi \cdot r_\delta} \cdot \left(0,08 + \frac{\frac{14,44}{i'_u}}{1 - \frac{\Delta i'_u}{i'_u}} \right) \cdot S. \quad (4)$$

Додаткові витрати енергії, зумовлені роботою стиснення у відключених циліндрах

$$\delta \Delta W_2 = \frac{u_k \cdot u_0}{4\pi \cdot r_\delta} \cdot \frac{\Delta i'_u \cdot p_a \cdot V_a}{n-1} \cdot (\varepsilon^{n-1} - 1) \cdot S, \quad (5)$$

де ε – ступінь стисання; p_a – тиск робочої суміші на початку такту стиснення; V_a – об'єм робочої суміші на початку стисання; n – показник політропи.

Відношення додаткових витрат енергії, зумовлених роботою стисання у відключених циліндрах до зміни додаткових витрат енергії двигуна

$$\frac{\delta \Delta W_2}{\delta \Delta W_1} = \frac{\Delta i'_u \cdot p_a \cdot V_a \cdot \frac{(\varepsilon^{n-1} - 1)}{n-1} \cdot V_{авт} \cdot u_k \cdot u_0}{2 \cdot N_e \cdot r_\delta \cdot \eta_{тр} \cdot \left(0,08 + \frac{\frac{14,44}{i'_u}}{1 - \frac{\Delta i'_u}{i'_u}} \right)} > 1, \quad (6)$$

де $V_{авт}$ – лінійна швидкість колісної машини; N_e – ефективна потужність двигуна.

Виконано розрахунок відносної додаткової витрати палива при відключенні частини циліндрів двигуна шляхом урахування нерівномірності тягової сили на ведучих колесах колісної машини при усталеному русі.

У таблиці 1 наведено розрахунок відносної додаткової витрати палива при відключенні (відмові) частини циліндрів двигуна.

Таблиця 1 – Результати розрахунку відносної додаткової витрати палива

| $i'_{\text{ц}}$ | $\Delta i_{\text{ц}}$ | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 6 | 1,19 | 1,48 | 1,97 | 2,94 | 5,84 | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 1,14 | 1,32 | 1,57 | 1,96 | 2,60 | 3,87 | 7,70 | - | - | - | - | - |
| 10 | 1,11 | 1,24 | 1,41 | 1,63 | 1,95 | 2,42 | 3,21 | 4,79 | 9,53 | - | - | - |
| 12 | 1,09 | 1,19 | 1,31 | 1,47 | 1,67 | 1,94 | 2,31 | 2,88 | 3,81 | 5,69 | 11,31 | - |

Запропоновано загальний підхід до розв'язання задачі вибору кількості відключених циліндрів у залежності від використання ефективної потужності. Зростаюча потужність автотракторних двигунів посилює проблему її повної реалізації в експлуатації, а отже, і проблему підвищення експлуатаційного ККД тягового режиму руху.

ККД колісної машини представлено як

$$\eta_{\text{к. м.}} = \frac{N_{\text{кор}}}{N_{\text{вит}}} = \frac{N_{\text{т}}}{N_{\text{т}} + N_{\text{втр}} + N_{\text{вл. пот.}}}, \quad (7)$$

де $N_{\text{кор}}$ – корисна потужність; $N_{\text{вит}}$ – витрачена потужність; $N_{\text{т}}$ – потужність на тягу колісної машини; $N_{\text{втр}}$ – потужність втрат; $N_{\text{вл. пот.}}$ – потужність, що витрачається на власні потреби.

Потужність втрат $N_{\text{втр}}$ складається з механічних, енергетичних і втрат на насосні ходи та привід допоміжного обладнання. Ці втрати оцінені з використанням технічної документації.

Шляхом обробки записів бортового реєстратора параметрів руху отримана залежність ККД колісної машини від миттєвої реалізованої потужності.

Побудована апроксимація отриманої дослідним шляхом залежності ККД автотракторного двигуна $\eta_{\text{к. м.}}$ від коефіцієнта використання потужності методом найменших квадратів у вигляді

$$\eta_{\text{к. м.}} = \frac{\xi}{a\xi + b}, \quad (8)$$

де ξ – коефіцієнт використання потужності.

У результаті ККД автотракторного двигуна в номінальному режимі становить 25-40 %. Запропонований алгоритм вибору кількості відключених циліндрів у залежності від миттєвого значення потужності (рис. 1).

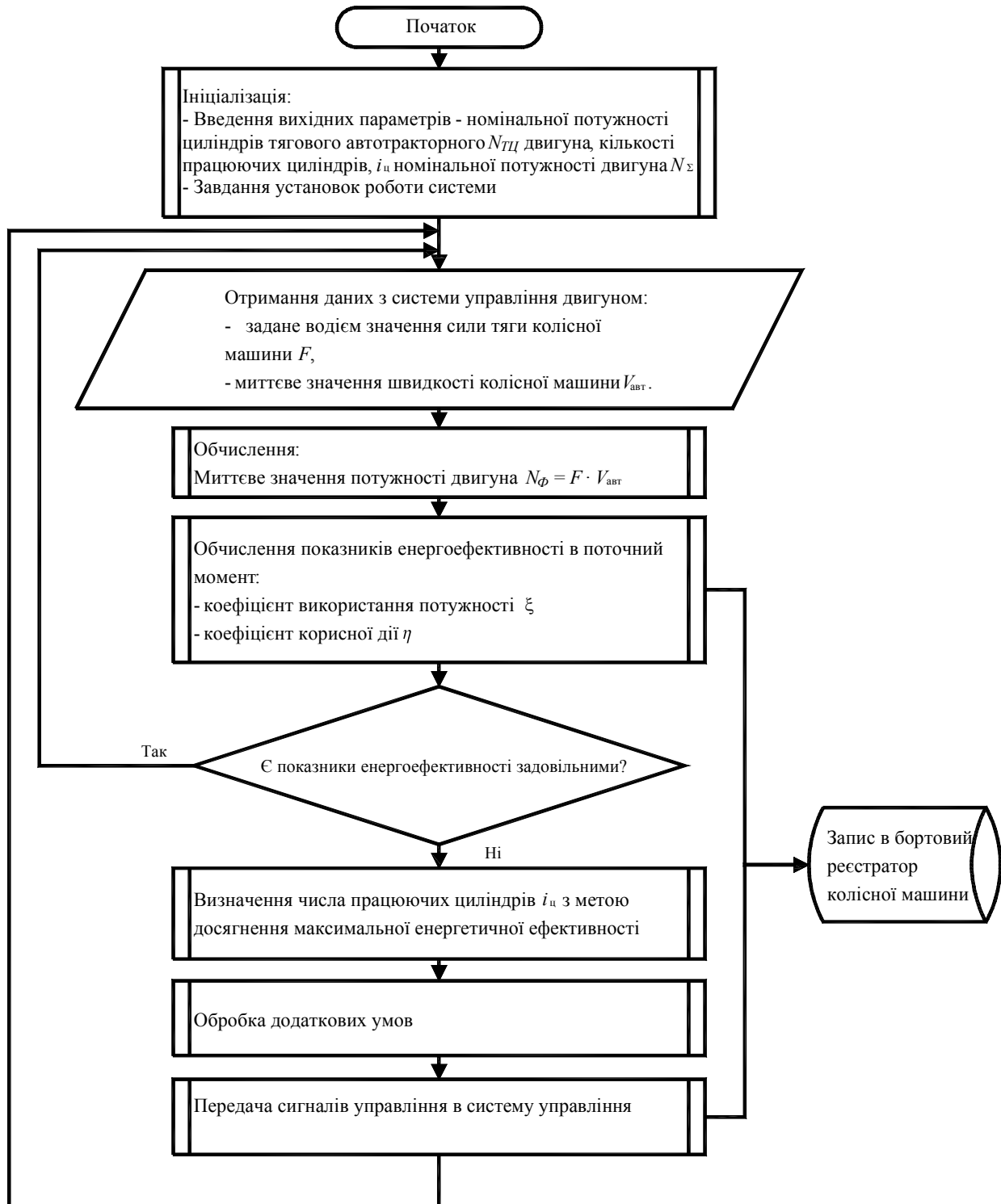


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму регулювання потужності й числа відключених циліндрів

Таким чином, при визначенні коефіцієнта використання потужності виконано оцінювання і аналіз значення ККД автотракторного двигуна.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень визначення зміни потужності на колесах машини при відключенні одного або декількох циліндрів двигуна. Дослідження склалися з двох етапів. На першому етапі об'єктом дослідження обрано легковий автомобіль Daewoo Lanos 1.5i (рис. 2а). На другому етапі об'єктом дослідження обрано вантажну колісну машину КрАЗ-255Б (рис. 2 б).



а



б

а – Daewoo Lanos 1.5i; б – КрАЗ-255Б
Рисунок 2 – Автомобілі, на яких проводились експериментальні дослідження

Метеорологічні умови проведення експерименту наведені в таблицях 2 та 3.

Агрегати трансмісії та ходової частини автомобілів перед початком випробувань були прогріті. Шини чисті, сухі, знос рисунка протектора не більше 5 %. Параметри, що реєструвалися під час проведення експериментального дослідження: кількість працюючих циліндрів двигуна колісної машини $i_{ц}$; передача, на якій рухається колісна машина; маса колісної машини m_a ; швидкість руху колісної машини $V_{авт}$; поздовжнє прискорення руху колісної машини \dot{V}_a ; час руху t .

Таблиця 2 – Метеорологічні умови під час проведення дорожнього експериментального дослідження автомобіля Daewoo Lanos 1.5i (19.07.2017)

| Час | Опади | Напрямок вітру | Швидкість вітру, м/с | Температура повітря, °С | Вологість, % | Атм. тиск мм рт. ст. |
|----------------------------------|------------|----------------|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|
| 6 ⁰⁰ -8 ⁰⁰ | Без опадів | С | 1 | 22 | 80 | 748 |

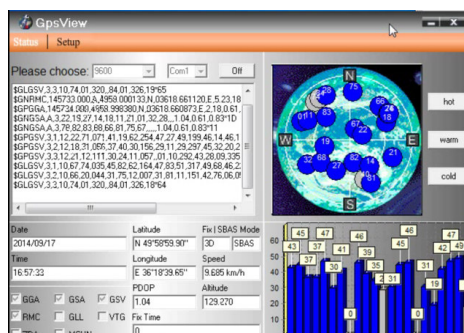
Таблиця 3 – Метеорологічні умови під час проведення дорожнього експериментального дослідження автомобіля КрАЗ-255Б (24.10.2019)

| Час | Опади | Напрямок вітру | Швидкість вітру, м/с | Температура повітря, °С | Вологість, % | Атм. тиск мм рт. ст. |
|-----------------------------------|------------|----------------|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|
| 9 ⁰⁰ -13 ⁰⁰ | Без опадів | З | 1 | 12 | 90 | 752 |

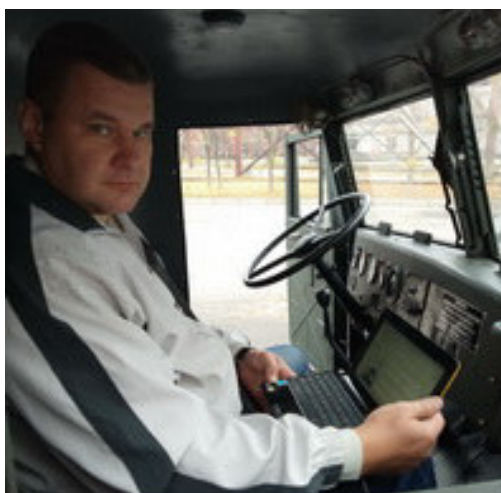
Швидкість руху колісної машини визначалася одночасно кількома способами: за показаннями спідометра; за показаннями GPS/GLONASS приймача Transystem GM-3N (рис. 3); шляхом інтегрування лінійного поздовжнього прискорення колісної машини.



а



б



в

а – GPS/GLONASS приймач Transystem GM-3N; б – вікно програми, що реєструє показання GPS / GLONASS приймача; в – керована оператором ЕОМ, що реєструє поздовжню швидкість колісної машини

Рисунок 3 – Реєстрація поздовжньої швидкості руху колісної машини за показами GPS / GLONASS приймача

Під час проведення експерименту здійснювалося відключення окремих циліндрів двигуна колісної машини. На легковому автомобілі Daewoo Lanos 1.5i таке відключення здійснювалося шляхом припинення подачі палива у циліндр. Для цього відключалося живлення (рис. 4) паливної форсунки, що призводило до припинення її роботи та перекриття подачі палива у циліндр. При такому відключенні присутні суттєві механічні втрати від стиснення повітря в камері згоряння відключеного циліндра під час такту стиснення. Для усунення цих механічних втрат здійснювалося вивертання свічки запалювання з циліндру, що відключається. Для оцінювання величини цих механічних втрат у відключеному циліндрі, експериментальні дослідження проводилися при здійсненні відключення циліндрів як за першим, так і за другим варіантом. Відключення циліндрів здійснювалося у відповідності до послідовності їх роботи через один.

Відключення
живлення
паливної
форсунки



Рисунок 4 – Відключення подачі палива до циліндра двигуна автомобіля Daewoo Lanos 1.5i

На вантажному автомобілі КрАЗ-255Б відключення циліндрів здійснювалося шляхом припинення подачі палива до паливної форсунки та зливання палива в ємність з під'єднаної паливної трубки високого тиску (рис. 5 а, б). Для усунення механічних втрат здійснювалося зняття паливної форсунки з циліндра, що відключається. Експериментальні дослідження також проводилися при відключенні циліндрів як за першим, так і за другим варіантом. Відключення циліндрів здійснювалося у відповідності до послідовності їх роботи таким чином, щоб забезпечити більш рівномірну роботу двигуна.

Факторами, що варіюються під час експерименту, є кількість працюючих циліндрів двигуна колісної машини $i_{\text{ц}}$ та тип схеми їх відключення.



а

б

а – відключення двох циліндрів; б – відключення чотирьох циліндрів
Рисунок 5 – Відключення подачі палива до циліндрів двигуна
автомобіля КрАЗ-255Б

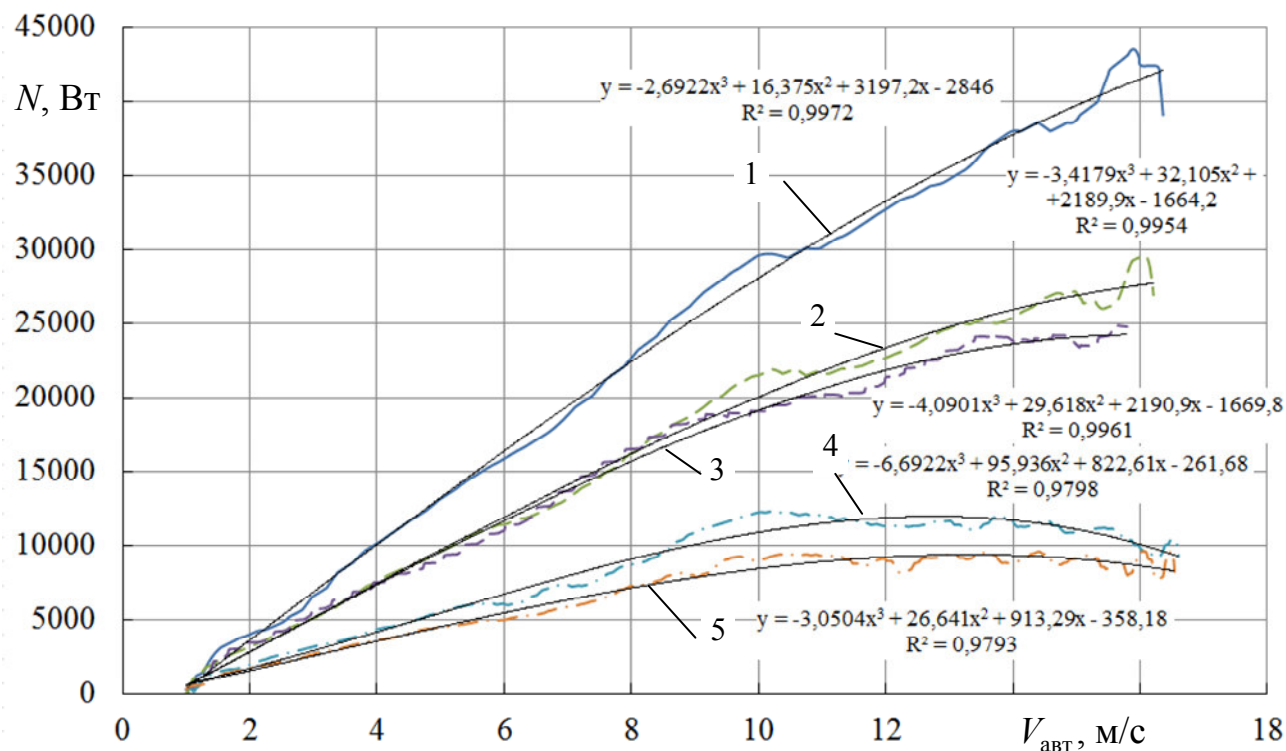
Таким чином, експериментальні дослідження є двофакторними. Вихідним параметром експериментального дослідження є потужність на ведучих колесах машини. При цьому фактори не корелюються між собою та є сумісними.

За результатами проведеного експериментального дослідження отримано дані, з використанням яких побудовано графіки зміни повздовжнього прискорення та швидкості автомобіля Daewoo Lanos 1.5i у часі при інтенсивному розгоні на другій передачі. На рисунку 6 відображено графіки та рівняння регресії залежності потужності на ведучих колесах від швидкості руху при інтенсивному розгоні на другій передачі автомобіля Daewoo Lanos 1.5i при різній кількості працюючих циліндрів. Криві форми $y=ax^3+bx^2+cx+d$, що апроксимують експериментальні дані отримані з високою точністю. Це підтверджено значенням коефіцієнту регресії R^2 , максимальне значення якого склало 0,9973, а мінімальне 0,9793.

За результатами апроксимації визначено максимальне та середнє значення різниці потужності двигуна з відключеними циліндрами при наявності та відсутності механічних (насосних) втрат. Так для автомобіля Daewoo Lanos 1.5i при відключенні одного циліндра середня різниця значення потужності в діапазоні швидкостей $V_{\text{авт}}=2-13$ м/с склала $\Delta N_{\text{сер}}=1405$ Вт. Максимальна різниця склала $\Delta N_{\text{max}}=1890$ Вт. При відключенні двох циліндрів середня різниця в діапазоні швидкостей $V_{\text{авт}}=2-13$ м/с склала $\Delta N_{\text{сер}}=1720$ Вт. Максимальна різниця склала $\Delta N_{\text{max}}=2694$ Вт, що в 1,43 рази більше ніж при відключенні лише одного циліндра.

Максимальна потужність на ведучих колесах, що витрачається на розгін автомобіля Daewoo Lanos 1.5i при всіх працюючих циліндрах за результатами експериментальних досліджень, склала 44300 Вт. Таким чином, різниця значення потужності при наявності та відсутності механічних (насосних) втрат при відключенні одного та двох циліндрів склала, відповідно, 4,3 % та 6,1 % від максимального значення зазначеного вище.

Потужність на ведучих колесах автомобіля Daewoo Lanos 1.5i при відключенні одного циліндра (механічні (насосні) втрати присутні) та при русі зі швидкістю 13 м/с падає в 1,56 рази (з 35570 Вт до 22830 Вт). Якщо усунути при цьому механічні (насосні) втрати у відключеному циліндрі, то падіння потужності зменшиться до 1,44 разів (з 35570 Вт до 24720 Вт).



— при всіх працюючих циліндрах; — — при відключеному одному циліндрі; — . — при відключених двох циліндрах

2, 4 – механічні (насосні) втрати у відключених циліндрах присутні;
3, 5 – механічні (насосні) втрати у відключених циліндрах відсутні

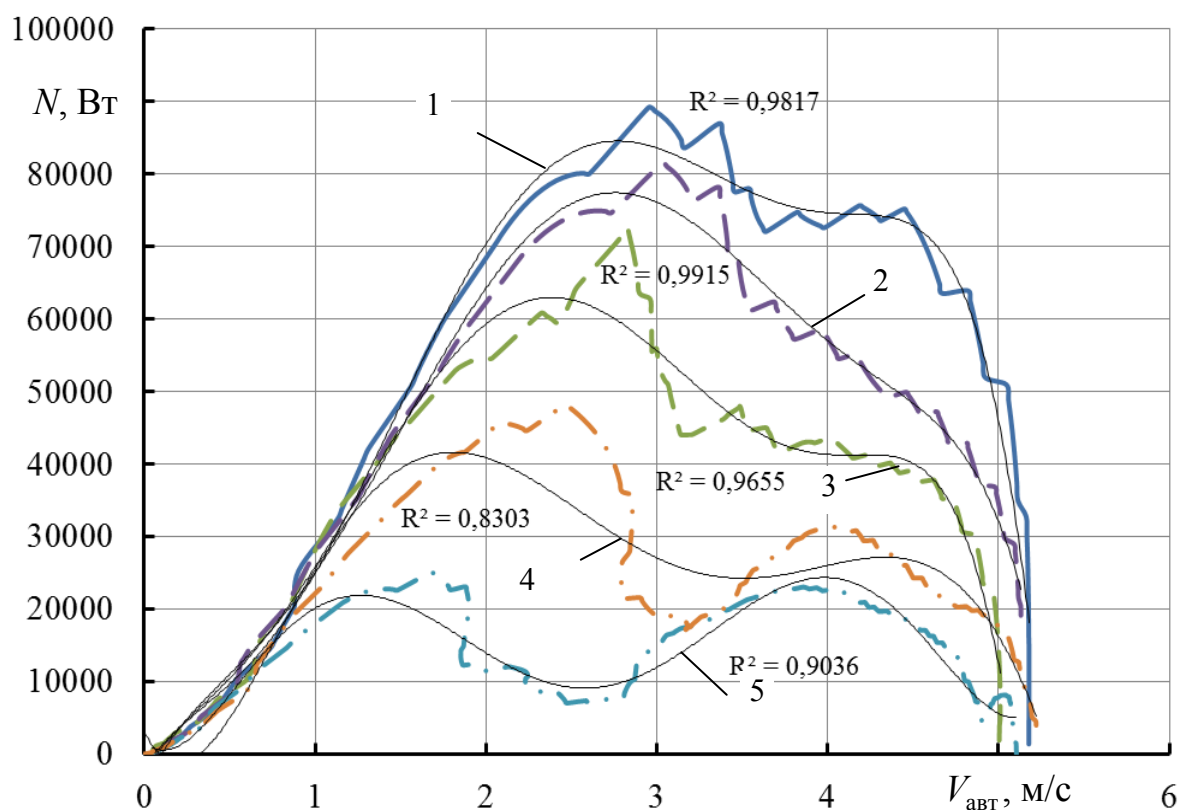
Рисунок 6 – Графіки та рівняння регресії залежності потужності на ведучих колесах від швидкості руху при інтенсивному розгоні на другій передачі автомобіля Daewoo Lanos 1.5i при різній кількості працюючих циліндрів

При відключенні двох циліндрів двигуна вказаного автомобіля (механічні (насосні) втрати присутні), потужність на його ведучих колесах падає від початкових значень у 3,82 рази (з 35570 Вт до 9315 Вт). Якщо усунути при цьому механічні (насосні) втрати у відключених циліндрах, то падіння потужності зменшиться до 2,98 разів (з 35570 Вт до 11940 Вт).

Аналогічним чином оброблено експериментальні дані, отримані за результатами експериментального дорожнього дослідження вантажного автомобіля КрАЗ-255Б. З використанням отриманих експериментальних даних побудовано графіки зміни повздовжнього прискорення та швидкості автомобіля КрАЗ-255Б у

часі при інтенсивному розгоні на другій передачі. Потужність на ведучих колесах колісної машини розрахована для усіх розглянутих варіантів роботи двигуна зазначеного автомобіля (при всіх працюючих циліндрах, при відключених двох та чотирьох циліндрах) та при наявності й відсутності механічних (насосних) втрат у відключених циліндрах. За результатами розрахунків побудовано графіки.

На рисунку 7 відображено графіки залежності потужності на ведучих колесах від швидкості руху при інтенсивному розгоні на другій передачі автомобіля КраЗ-255Б при різній кількості працюючих циліндрів. Криві форми $y=ax^6+bx^5+cx^4+dx^3+ex^2+fx+g$, що апроксимують експериментальні дані отримані з високою точністю. Це підтверджено значенням коефіцієнту регресії R^2 , максимальне значення якого склало 0,9915, а мінімальне 0,8303.



— при всіх працюючих циліндрах; — — при відключених двох циліндрах;
 — . — при відключених чотирьох циліндрах

2, 4 – механічні (насосні) втрати у відключених циліндрах присутні;

3, 5 – механічні (насосні) втрати у відключених циліндрах відсутні

Рисунок 7 – Графіки та рівняння регресії залежності потужності на ведучих колесах від швидкості руху при інтенсивному розгоні на другій передачі автомобіля КраЗ-255Б при різній кількості працюючих циліндрів.

Для автомобіля КраЗ-255Б при відключенні двох циліндрів середня різниця значення потужності в діапазоні швидкостей $V_{авт}=1-5$ м/с склала $\Delta N_{сер}=11151$ Вт. Максимальна різниця склала $\Delta N_{max}=19917$ Вт. При відключенні чотирьох циліндрів

середня різниця в діапазоні швидкостей $V_{\text{авт}}=1-5$ м/с склала $\Delta N_{\text{сер}}=13653$ Вт. Максимальна різниця склала $\Delta N_{\text{max}}=27437$ Вт, що в 1,38 рази більше ніж при відключенні лише двох циліндрів.

Максимальна потужність на ведучих колесах, що витрачається на розгін автомобіля КрАЗ-255Б при всіх працюючих циліндрах за результатами експериментальних досліджень склала 89100 Вт. Різниця значення потужності при наявності та відсутності механічних (насосних) втрат при відключенні двох та чотирьох циліндрів склала відповідно 22,3 % та 30,8 % від максимального значення зазначеного вище.

Потужність на ведучих колесах автомобіля КрАЗ-255Б при відключенні двох циліндрів (механічні (насосні) втрати присутні) та при русі зі швидкістю 3 м/с падає в 1,44 рази (з 83528 Вт до 57956 Вт). Якщо усунути при цьому механічні (насосні) втрати у відключеному циліндрі, то падіння потужності зменшиться до 1,1 разів (з 83528 Вт до 76153 Вт).

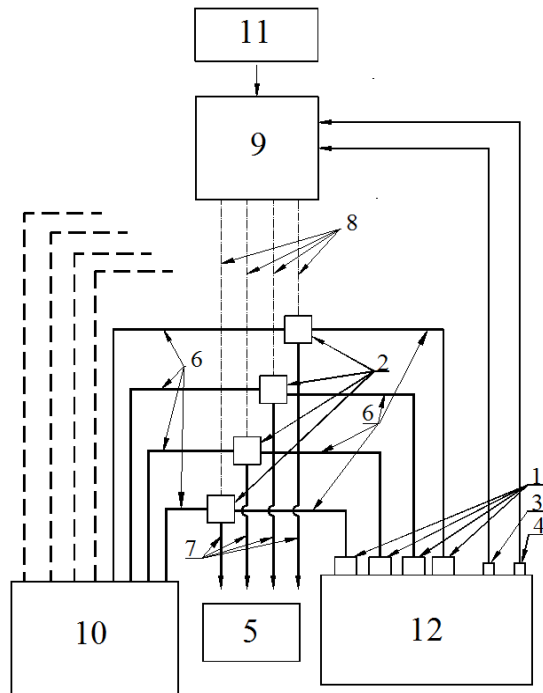
При відключенні двох циліндрів двигуна вказаного автомобіля (механічні (насосні) втрати присутні), потужність на його ведучих колесах падає від початкових значень в 6,97 рази (з 83528 Вт до 11980 Вт). Якщо усунути при цьому механічні (насосні) втрати у відключених циліндрах, то падіння потужності зменшиться до 3,09 разів (з 83528 Вт до 27057 Вт).

Отримані дані підтверджують доцільність усунення механічних (насосних) втрат у відключених циліндрах, відключення яких може відбуватися з метою економії палива при роботі двигуна вантажного автомобіля з невеликим навантаженням та на холостому ході. Причому доцільність усунення механічних (насосних) втрат у відключених циліндрах вантажного автомобіля суттєво більша ніж для легкового автомобіля.

У третьому розділі також представлено загальну схему системи паливоподачі з пропонуваними блоком керування (рис. 8) та електромагнітними клапанами (рис. 9). На рисунку 9 а зображено нормально закритий електромагнітний клапан у відкритому стані, на рисунку 9 б – у закритому стані.

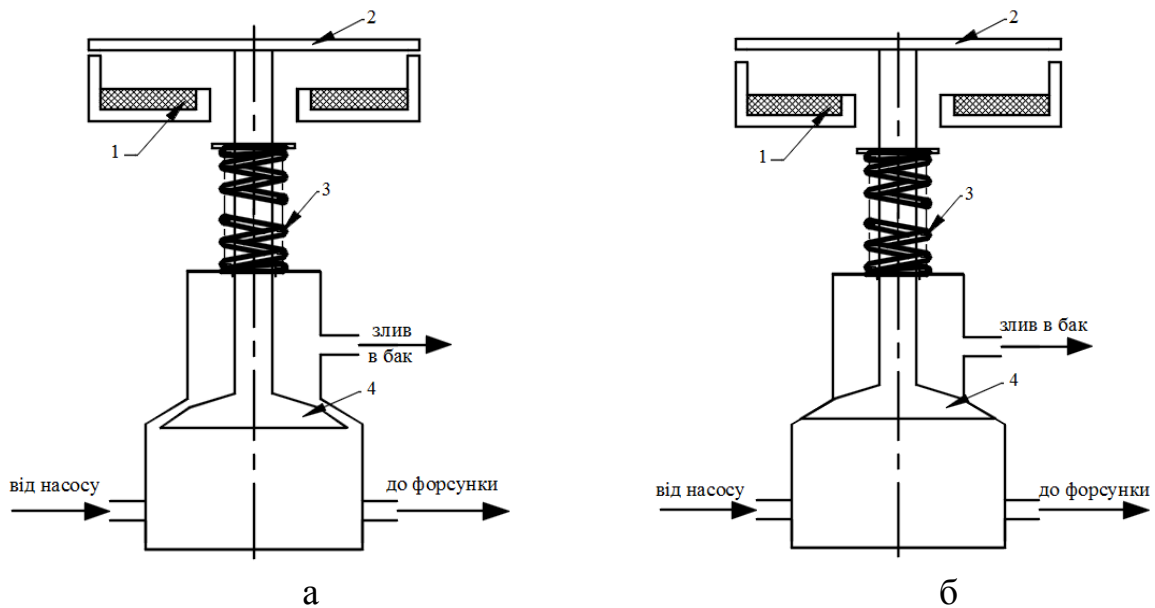
Пропонована система працює наступним чином. Паливо, що нагнітається від паливного насосу високого тиску (ПНВТ) 10 (рис. 8), надходить до трубопроводу 6, де зростає його тиск. При досягненні необхідного рівня тиску відкривається форсунка 1 і починається впорскування палива до циліндру двигуна.

Тиск палива в магістралі дозволяє забезпечувати щільне закриття електромагнітного клапана 4 (рис. 9 б). За командою електронного блоку керування (ЕБК) 9 (рис. 8), що виробляється на підставі інформації від датчиків частоти обертання та положення колінчастого вала двигуна 3 і 4 (рис. 8) і датчика положення педалі керування 11 (рис. 8), відбувається відкриття електромагнітного клапана 4 (рис. 9 а) у момент зниження тиску палива в магістралі після того, як паливо через форсунку 1 (рис. 8) надійшло до циліндру двигуна. Відкриття клапану в момент мінімального тиску в магістралі високого тиску дозволяє застосовувати менш потужний електромагніт 1 (рис. 9 а, 9 б). Припинення зливу палива відбувається знеструмленням обмотки електромагніту 1 (рис. 9 б) клапана, що призводить до повернення клапана 4 у закрите положення під дією пружини 3.



1 – форсунки; 2 – електромагнітні клапани, 3,4 – датчики обертання та положення колінчастого вала, 5 – паливний бак, 6 – лінії високого тиску палива, 7 – лінії зливання палива, 8 – з'єднувальні дроти; 9 – блок керування (ЕБК), 10 – паливний насос високого тиску (ПНВТ), 11 – датчик положення педалі керування (ДПКП), 12 – двигун

Рисунок 8 – Схема відключення циліндрів за допомогою електромагнітних клапанів



1 – статор; 2 – якорь; 3 – пружина; 4 – клапанний елемент

Рисунок 9 – Схема режимів роботи електромагнітних клапанів під час відключення циліндрів

Пропонована система відключення паливоподачі має вдосконалені процеси відключення циліндрів автотракторного двигуна та враховує моменти зниження тиску в лініях високого тиску палива й контролю стану піджимних пружин електромагнітних клапанів, що встановлені поза межами їхніх полостей високого тиску, менш потужні електромагніти та пружини.

У четвертому розділі виконано прогнозування та оцінювання надійності автотракторного двигуна при відключенні частини циліндрів.

Розроблено алгоритм оцінювання напрацювання деталей двигуна до відмови по втомній міцності при частковому відключенні циліндрів, блок-схема якого наведена на рисунку 10.

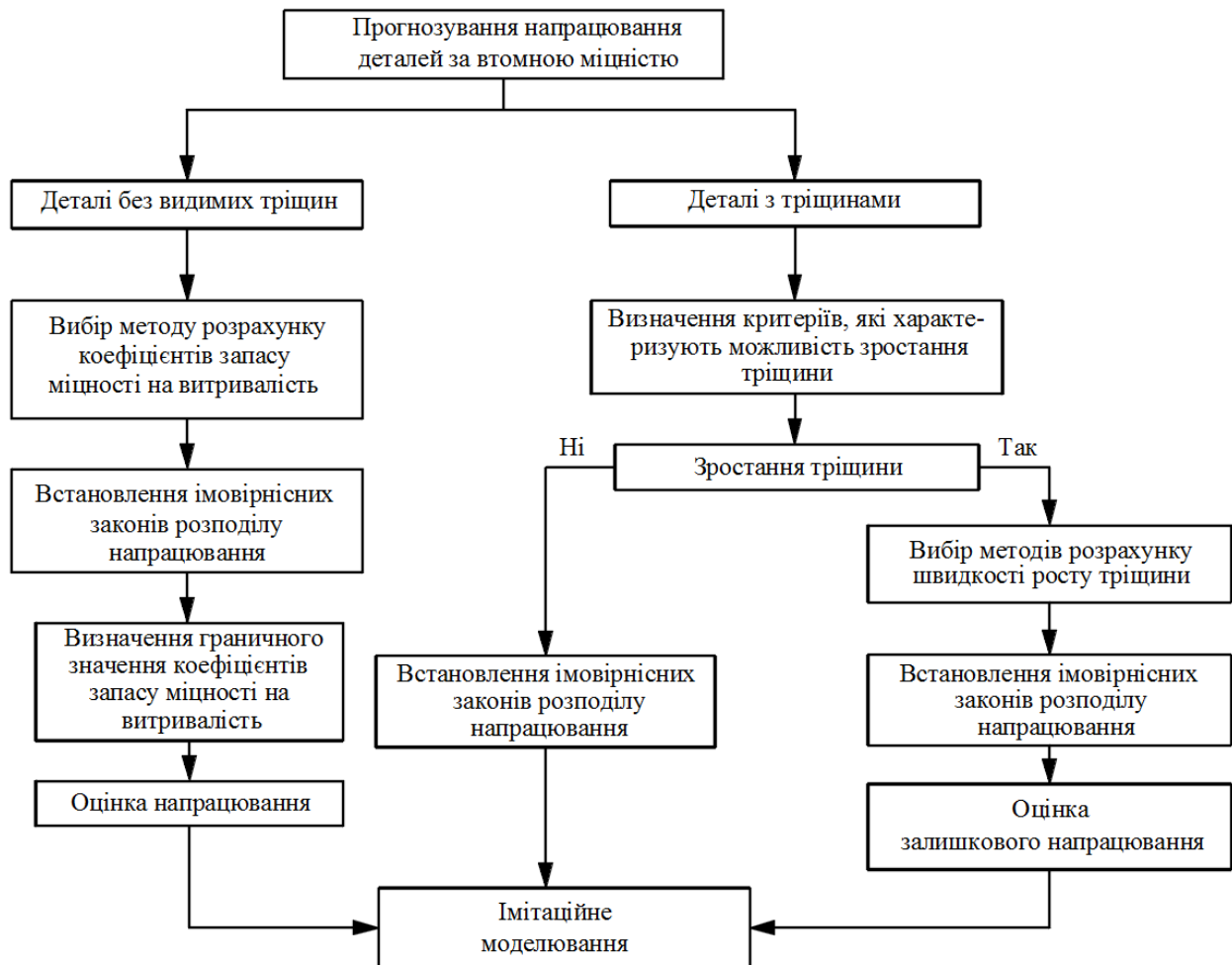


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритму оцінювання напрацювання деталей автотракторних двигунів при відключенні частини циліндрів за критерієм втомної міцності

Обґрунтовано критерій і розроблено метод визначення ймовірності відмови двигуна за коефіцієнтом запасу міцності при відключенні частини циліндрів. Виконано оцінювання залишкового напрацювання до відмови деталі з тріщиною в автотракторному двигуні при відключенні частини циліндрів.

При відключенні частини циліндрів на режимах часткових навантажень інші циліндри переводяться на роботу при більшому навантаженні. Технологія відключення циліндрів досі не набула широкого поширення. Причин тому кілька. Головні з них – ступінчастість регулювання, наявність дроселювання між режимами роботи, порушення температурного режиму й рівномірності зносу циліндрів. Експериментальні дослідження проводилися як при відключених, так і при всіх включених циліндрах автотракторного двигуна.

Прогнозоване залишкове напрацювання деталі з тріщиною при сталому навантаженні двигуна з відключеними циліндрами. У разі неусталеного навантаження, характерного для експлуатаційних режимів роботи автотракторного двигуна з відключеними циліндрами, розрахунок напрацювання для кожного режиму виконується окремо. Результатом кожного такого розрахунку є загальне еквівалентне напрацювання

$$t_{i \text{ екв}} = t_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{екв}}} \right)^m, \quad (9)$$

де m – показник нахилу кривої втоми; t_i – напрацювання кожного режиму експлуатації АТД; σ_i – напруги діючі на окремих режимах експлуатації АТД; $\sigma_{\text{екв}}$ – загальне еквівалентне напруження при тривалості кожного режиму експлуатації АТД.

Сумарне еквівалентне число $N_{\text{екв}}$ циклів зміни навантажень визначатиметься за формулою

$$N_{\text{екв}} = \sum_{i=1}^z N_i t_{i \text{ екв}} = \sum N_i t_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{екв}}} \right)^m, \quad (10)$$

де N_i – кількість циклів навантаження.

Таким чином, користуючись поняттям еквівалентних навантажень можна замінити обчислення кожного експлуатаційного режиму з різною кількістю відключених циліндрів окремо одним розрахунком за викладеною вище методикою.

У дисертації досліджено можливість виконання прогнозу й оцінювання ризику стосовно до випадків, коли під дією навантажень тріщина продовжує розвиватися та визначається залишкове напрацювання до відмови $N_{\text{відм}}$ цієї деталі та, коли тріщина не розвивається й можна експлуатувати двигун навіть з відключеними циліндрами до наступного огляду без усунення тріщини в деталі. Для першого слід зазначити, що напрацювання $N_{\text{відм}}$ (у циклах навантаження), це тільки математичне очікування, щодо якого дійсне значення $N_{\text{д}}$ може відхилитися як у більший, так і в менший бік досить значно. Це відхилення характеризується законом розподілу зі своїми параметрами. При напрацюванні деталі $N_{\text{о}}$, вплив випадкових факторів призводить до того, що

залишковий ресурс $N_{\text{зал}} = N_{\text{д}} - N_{\text{о}}$ також є випадковою величиною і може не перевищувати планований період експлуатації $N_{\text{н}}$. Таким чином, вирішується задача знаходження ймовірності відмови Q деталі з тріщиною автотракторного двигуна при відключенні частини циліндрів на заданий період експлуатації $N_{\text{н}}$. Рішення засновано на проведенні $N_{\text{вип}}$ статистичних випробувань, у результаті яких визначається: скільки разів ($N_{\text{н.і}}$) заданий період експлуатації $N_{\text{н}}$ виявився більше залишкового ресурсу, визначеного із заданим значенням коефіцієнта варіації ν .

Таким чином, прогноз й оцінювання ризику дозволяють перейти від детермінованого прогнозу залишкового ресурсу до ймовірнісного його оцінювання, що є вихідною інформацією для прийняття мотивованих рішень для управління ризиками експлуатації автотракторного двигуна при відключенні частини циліндрів.

Визначено максимально допустиму кількість відключених циліндрів, що може призводити не тільки до зниження потужності двигуна, але і зниження надійності роботи складових його вузлів й агрегатів

$$N_{e\Delta i_{\text{ц}}} = N_e \left(1 - \Delta i_{\text{ц}} \frac{1}{i'_{\text{ц}} \eta_{\text{м}}} \right). \quad (11)$$

Таким чином, поступово збільшуючи $\Delta i_{\text{ц}}$ у формулі (11), отримуємо послідовність значень $N_{e\Delta i_{\text{ц}}}$, ці значення порівнюємо з $N_{e_{\text{гр}}}$, визначеним за формулою $N_{e_{\text{гр}}} = 0,09 \cdot N_{e_{\text{ном}}}$. Останнє значення $\Delta i_{\text{ц}}$, при якому виконується умова $N_{e\Delta i_{\text{ц}}} > N_{e_{\text{гр}}}$, є максимально допустимим числом циліндрів, що відключили в діагностичній моделі двигуна.

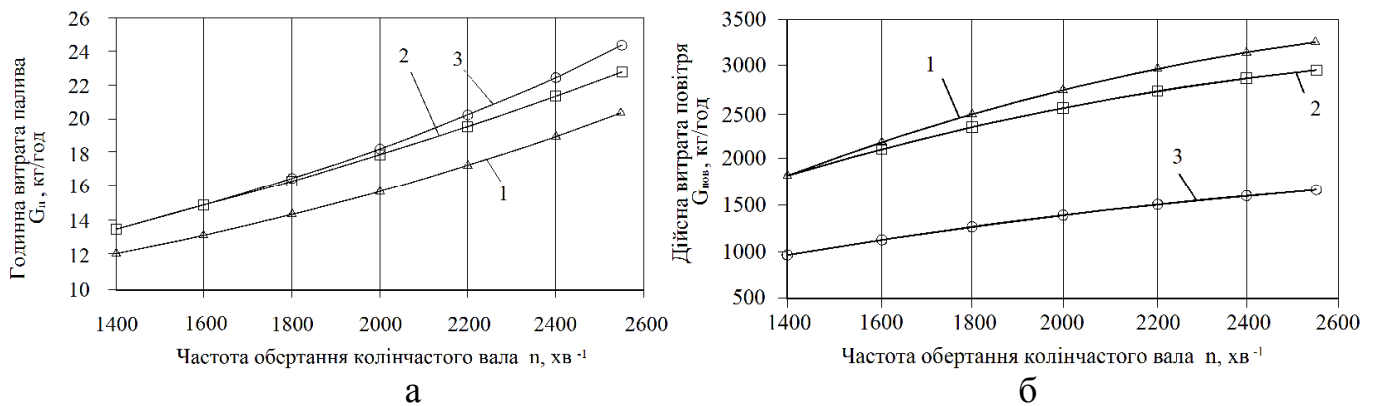
У п'ятому розділі наведено результати теоретичних й експериментальних досліджень впливу робочих процесів автотракторного двигуна на динамічні властивості колісних машин при відключенні частини циліндрів.

Робота автотракторного двигуна на режимах малих навантажень і холостого ходу, як правило, характеризується погіршенням його основних показників. У зв'язку із цим виникає необхідність поліпшення роботи автотракторного двигуна на цих режимах. Одним із способів є відключення частини циліндрів двигуна. Для виявлення впливу відключення частини циліндрів двигуна на його роботу на кафедрі «Технології машинобудування і ремонту машин» ХНАДУ проведені відповідні дослідження.

Дослідження характеристик на прикладі двигуна КамАЗ-740 при відключенні частини циліндрів проведені на стаціонарному стенді КІ-5274 в умовах авторемонтного виробництва ХАРЗ-110 та ХАРЗ-126. Гальмівний стенд обладнаний вимірювальними пристроями та контрольною апаратурою згідно ГОСТ 14846-81 і включає в себе електричну балансиру машину АКБ 101-4. Параметри роботи автотракторного двигуна КамАЗ-740 визначали при трьох варіантах випробувань: 1 – випробування автотракторного двигуна без відключення циліндрів; 2 – випробування з відключенням

чотирьох циліндрів припиненням подачі палива; 3 – випробування з відключенням чотирьох циліндрів одночасним припиненням подачі палива й відсутністю насосних втрат циліндро-поршневої групи (ЦПГ) у відключених циліндрах. При відключенні насосних втрат ЦПГ, клапани залишаються працювати, але застосовується перепускний клапан на кожному циліндрі, що встановлюється до отвору паливної форсунки. Варіанти випробувань на рисунках позначено відповідно цифрами 1, 2, 3.

Зі збільшенням частоти обертання вала автотракторного двигуна часова витрата палива підвищується при всіх варіантах випробувань, що пов'язано зі збільшенням циклової подачі $q_{ц}$ й зі збільшенням кількості циклів в одиницю часу $n_{ц}$ (рис. 11 а).



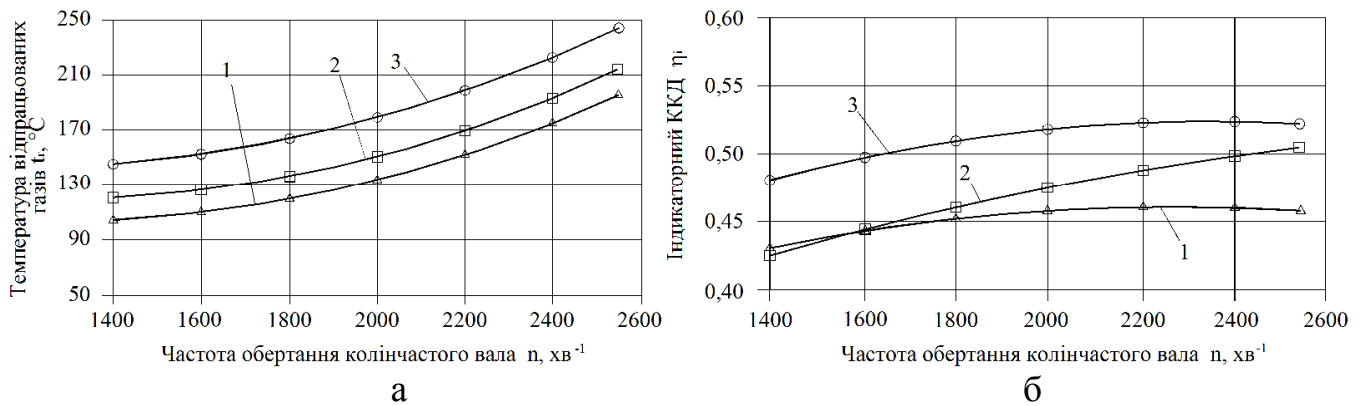
1 – при всіх працюючих циліндрах; 2 – при відключенні подачі палива у 50 % циліндрів; 3 – з відключенням палива у 50 % циліндрів та відсутністю насосних втрат; а – годинна витрата палива; б – дійсна витрата повітря
Рисунок 11 – Графіки залежностей від частоти обертання колінчастого вала двигуна

При відключенні тільки подачі палива (крива 2) годинна витрата палива зростає $G_{п}$ від 1,83 кг/год при $n=1400$ хв⁻¹ до 4,97 кг/год при $n=2550$ хв⁻¹, при цьому різниця з першим варіантом знаходиться в межах від 0 до 0,5 кг/год. При третьому варіанті $G_{п}$ зростає від 1,33 кг/год до 5,11 л/год, а в порівнянні з першим різниця становить від 0,41 кг/год до 1,1 кг/год. Зниження годинної витрати палива при другому і третьому варіантах, порівняно з першим, пояснюється тим, що при відключенні подачі палива в частині циліндрів, в інших – покращився процес згоряння завдяки поліпшенням випаровування (за рахунок підвищення температури), збільшенню далекобійності струменя палива, поліпшенню розпилу, зниженню нерівномірності подачі по циліндрах через збільшення циклової подачі, тобто підвищився індикаторний ККД. Більше зниження в 3 варіанті пов'язано з тим, що додатково до поліпшення процесу згоряння відбувається зменшення втрат від насосних ходів у приводі ЦПГ чотирьох циліндрів.

При 1, 2, 3 варіантах випробувань $G_{пов}$ збільшується (рис. 11 б) через зростаюче розрідження у впускному колекторі при підвищенні частоти обертання колінчастого вала.

Температура відпрацьованих газів зростає при всіх варіантах (рис. 12 а), оскільки збільшується кількість введеного за цикл тепла (збільшенням циклової

подачі), зменшуються втрати тепла (із зменшенням часу циклу), догорання продовжується на такті випуску (за рахунок зменшення часу процесу згорання).



1 – при всіх працюючих циліндрах; 2 – при відключенні подачі палива в 50 % циліндрів; 3 – з відключенням палива в 50 % циліндрів та відсутністю насосних втрат; а – температура відпрацьованих газів; б – індикаторний ККД
Рисунок 12 – Графіки залежностей від частоти обертання колінчастого вала двигуна

При другому і третьому варіантах температура відпрацьованих газів збільшилася в порівнянні з першим, оскільки зросла циклова подача палива, при другому варіанті вона нижча, ніж при третьому, тому що, відпрацьовані гази, що виходять з працюючих другого, третього, п'ятого й восьмого циліндрів, розбавляються повітрям, що виходить з 1, 4, 6 та 7 циліндрів.

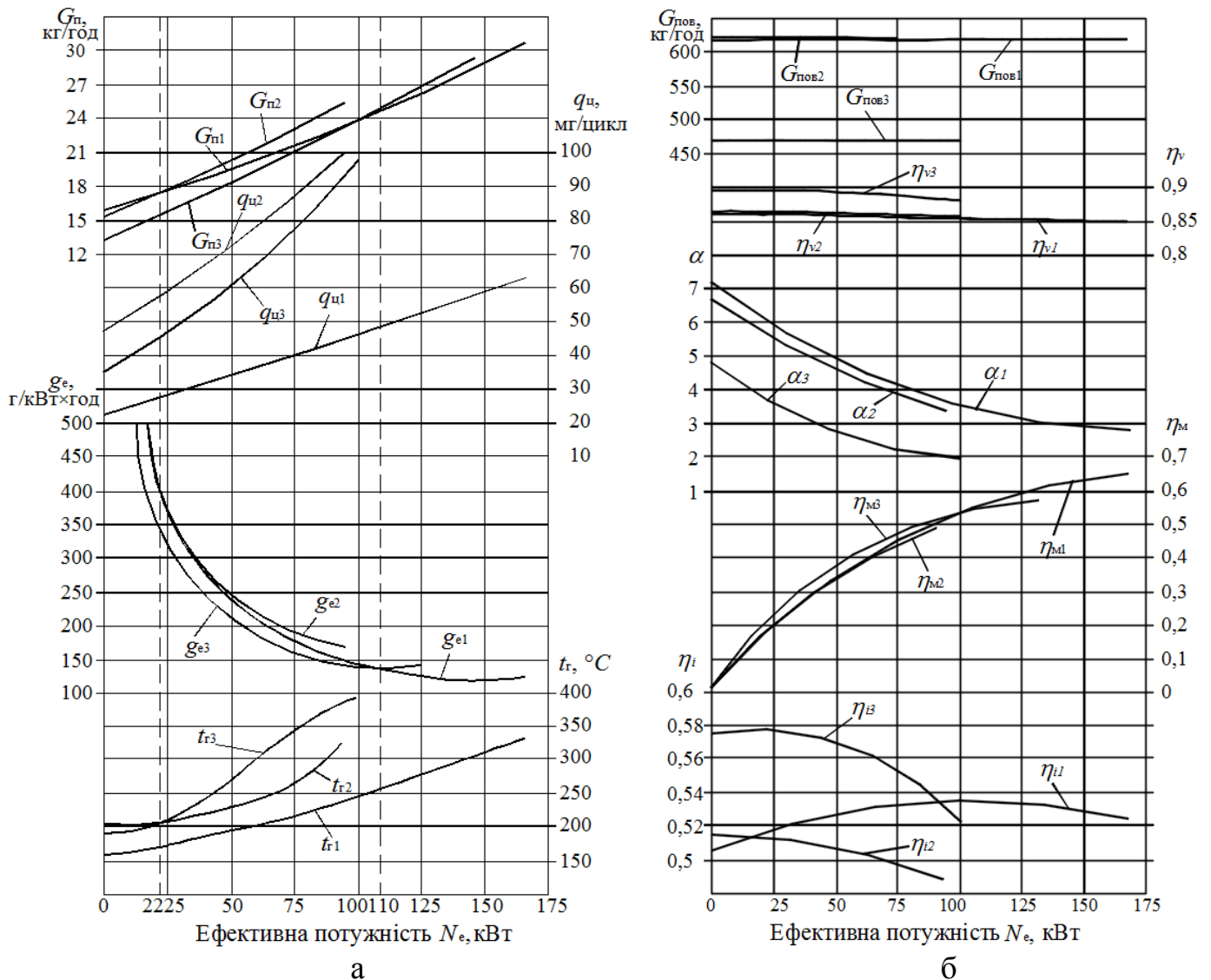
Індикаторний ККД залежить головним чином від P_i і α , і підвищується при всіх варіантах випробування до певної частоти (рис. 12 б), оскільки темп зростання середнього індикаторного тиску перевершує темп зниження α , а при n вище цієї частоти індикаторний ККД незначно зменшується, тому що темп зниження α стає вищим за темп зростання P_i .

Годинна витрата палива (рис. 13 а) визначалася по залежності

$$G_{\text{П}} = K \cdot \frac{(P_i - P_{\text{МВ}}) \cdot V_h \cdot i'_c \cdot n}{\eta_i \cdot \eta_{\text{М}}} \quad (12)$$

де $K = 0,7$ – постійна для даного АТД; $\tau = 4$ – число тактів; $H_u = 42,7$ – нижча теплота згорання дизельного палива, МДж/кг; P_i – середній індикаторний тиск, МПа; $P_{\text{МВ}}$ – умовний тиск механічних втрат, МПа; η_i – індикаторний ККД; $\eta_{\text{М}}$ – механічний ККД; V_h – об'єм одного циліндру, л; n – частота обертання колінчастого вала, хв^{-1} .

На рисунку 13 наведено навантажувальну характеристику двигуна КамАЗ-740, а саме залежність питомої витрати палива й інших показників роботи автотракторного двигуна від ефективної потужності при постійній частоті обертання колінчастого вала. На рисунках 13 а, б представлені результати досліджень при частоті обертання колінчастого вала $n = 2600 \text{ хв}^{-1}$.



1 – при всіх працюючих циліндрах; 2 – при відключенні подачі палива в 50 % циліндрів; 3 – з відключенням палива в 50 % циліндрів та відсутністю насосних

а – G_n – годинна витрата палива, $q_{ц}$ – циклова подача палива, g_e – питома ефективна витрата палива, $t_r = f(N_e)$ – температура відпрацьованих газів;

б – $G_{пов}$ – дійсна витрата повітря, η_v – коефіцієнт наповнення циліндру, α – коефіцієнт надлишку повітря, η_m – механічний ККД,

$\eta_i = f(N_e)$ – індикаторний ККД

Рисунок 13 – Навантажувальна характеристика на прикладі 8-ми циліндрового автотракторного двигуна КамАЗ-740 ($n = 2600$ хв⁻¹)

Циклова подача палива $q_{ц}$, мг/цикл (рис. 13 а) визначалася по залежності

$$q_{ц} = 3,3 \cdot 10^4 \cdot \frac{G_n}{i_{ц} \cdot n} \quad (13)$$

Потужність механічних втрат багатоциліндрового автотракторного двигуна при

різному числі працюючих циліндрів без наддування N_{MB} складається з наступних складових: потужність, що витрачається на подолання тертя $N_{\text{тер}}$, потужність, що витрачається на здійснення насосних ходів $N_{\text{НВ}}$, потужність на привід допоміжних механізмів $N_{\text{ДМ}}$ (паливного, мастильного й водяного насосів, вентилятора, газорозподільчого механізму) та потужність, що втрачається за рахунок зміни теплового балансу між працюючими та непрацюючими циліндрами N_t .

Отримано вираз для визначення механічних втрат автотракторного двигуна при відключенні частини його циліндрів

$$N_{\text{MB}}^{i'_{\text{ц}}} = N_{\text{MB}}^{i'_{\text{ц}}} \cdot \left(\frac{\Delta p_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}} \cdot k_1 + \frac{\Delta i_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}} \cdot f_{\Delta} \cdot \Delta_{\text{MB}} \cdot \Delta_t \right), \quad (14)$$

де $N_{\text{MB}}^{i'_{\text{ц}}}$ – потужність механічних втрат двигуна без відключення циліндрів; $\Delta p_{\text{ц}}$ – число працюючих циліндрів; k_1 – коефіцієнт, що враховує зміну механічних втрат у працюючих циліндрах (для розрахунку прийємо допущення, що механічні втрати не змінюються від навантаження); f_{Δ} – коефіцієнт, що характеризує зміну втрат на тертя при прокручуванні циліндрів (для розрахунку прийємо допущення, що вони не змінюються); Δ_{MB} – частка потужності механічних втрат відключених циліндрів, порівняно з потужністю механічних втрат циліндрів двигуна без відключень.

При відключенні палива й усуненні насосних втрат у ЦПГ за рахунок впровадження перепускного клапану в камеру згорання

$$\Delta_{\text{MB}} = 1 - (\Delta_{\text{пн}} + \Delta_t + \Delta_{\text{нх}}), \quad (15)$$

де $\Delta_{\text{пн}}$ – частка механічних втрат, що витрачається на привід паливного насосу; Δ_t – частка втрат від зміни температурного балансу $\Delta_{\text{нх}}$ – частка втрат на насосні ходи.

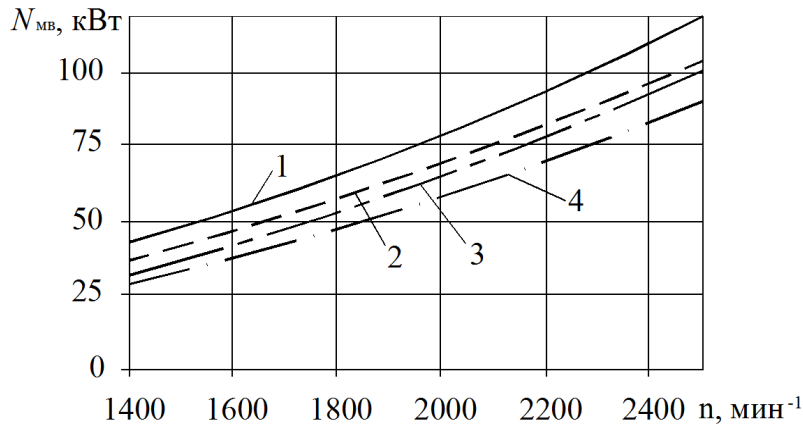
Коефіцієнт зміни потужності автотракторного двигуна при відключенні частини циліндрів k_{PN} при допущеннях $k_1 = 1$ і $f_{\Delta} = 1$

$$k_{PN} = \frac{\Delta p_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}} - \frac{\Delta i_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}} \cdot \Delta_{\text{MB}} \cdot \Delta_t \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{м}}} - 1 \right). \quad (16)$$

Таким чином потужність багатциліндрового автотракторного двигуна при різному числі працюючих циліндрів без наддування

$$N_e^{i'_{\text{ц}}} = N_e \cdot \left(\frac{\Delta p_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}} - \frac{\Delta i_{\text{ц}}}{i'_{\text{ц}}} \cdot \Delta_{\text{MB}} \cdot \Delta_t \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{м}}} - 1 \right) \right). \quad (17)$$

При відключенні подачі палива й усуненні насосних втрат у ЦПГ у чотирьох циліндрах згідно з розрахунком, потужність механічних втрат зменшується на 10,7 % (рис. 14).



1 – $N_{\text{мв}8}$ в експлуатації; 2 – $N_{\text{мв}4}$ в експлуатації;
3 – $N_{\text{мв}8}$ при розрахунку; 4 – $N_{\text{мв}4}$ при розрахунку

Рисунок 14 – Залежність параметрів механічних втрат на прикладі двигуна КамАЗ-740 від частоти обертання колінчастого вала при всіх та половині працюючих циліндрів

При експериментальному дослідженні з підвищенням частоти обертання колінчастого вала двигуна від 1400 хв^{-1} до 2400 хв^{-1} при номінальній потужності $N_{\text{ном}} = 154,5 \text{ кВт}$, потужність механічних втрат вихідного двигуна збільшилася від $42,65 \text{ кВт}$ до $118,1 \text{ кВт}$, або на $\Delta N_{\text{мв}} = 75,45 \text{ кВт}$, а після усунення насосних втрат у першому, четвертому, шостому та восьмому циліндрах із зростанням частоти обертання вала двигуна в тих же межах – від $36,65 \text{ кВт}$ до $104,25 \text{ кВт}$, або на $\Delta N_{\text{мв}} = 67,6 \text{ кВт}$.

Характер зміни механічного ККД від коефіцієнта завантаження двигуна при всіх працюючих і відключених циліндрах практично однаковий (рис. 15), а максимальна величина його при всіх працюючих циліндрах $\eta_{\text{м}} = 0,83$; при семи – $0,79$; при шести – $0,68$; при п'яти – $0,5$; при чотирьох – $0,34$; при трьох – $0,14$; при двох – $0,04$ що практично неможливо тому, що потужність механічних втрат є більшою ніж ефективна потужність двигуна, як видно на рисунку 15 при величині механічного ККД менше $0,1$.

При вибраних значеннях чисел працюючих циліндрів $i_{\text{ц}}'$ годинна витрата палива $G_{\text{п}}$, кг/год визначається формулою

$$G_{\text{п}} = \left(\xi \cdot n \cdot \frac{M_{\text{HKM}}}{9550} + N_{\text{мв}}^{i_{\text{ц}}'} \right) \frac{3,6}{H_u \eta_i}, \quad (18)$$

де M_{HKM} – номінальний крутильний момент двигуна, Н·м.

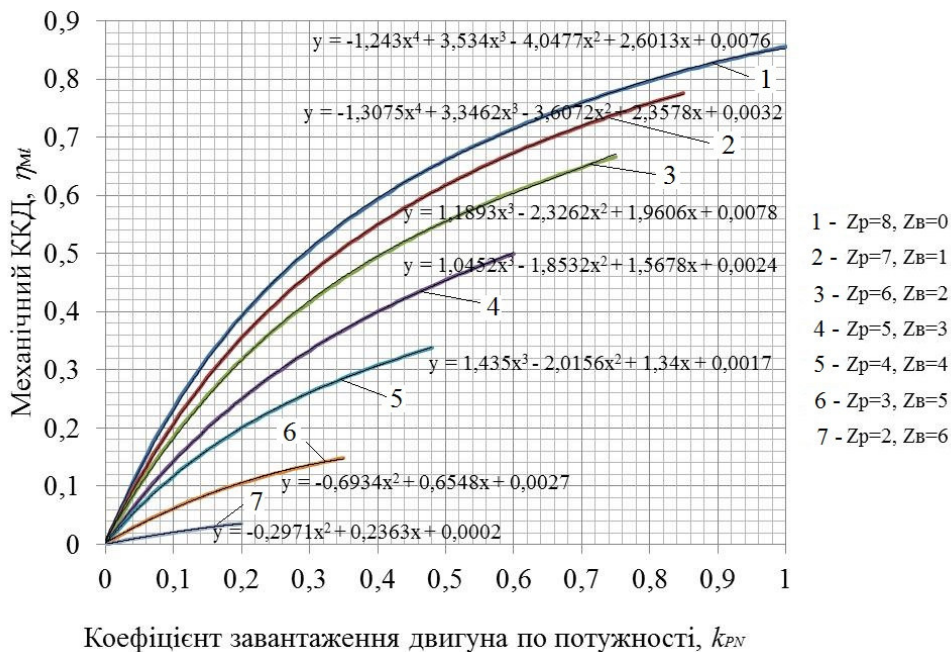


Рисунок 15 – Кореляційна залежність механічного ККД від величини коефіцієнта зміни потужності k_{PN} при різному числі працюючих циліндрів

Запропонована методика розрахунку механічних втрат дозволяє з точністю близько 10% визначати вплив кількості відключених циліндрів на ефективну потужність двигуна, потужність механічних втрат і механічний ККД. Установлено, що при відключенні половини циліндрів, номінальна потужність двигуна становить 35-40 % від початкової, розбіжність експериментальних і розрахункових результатів коефіцієнта зміни потужності механічних втрат не більше 8 %; розбіжність розрахункових й експериментальних результатів коефіцієнта навантаження по потужності не більше 5 %; механічний ККД при завантаженні двигуна до 48 % підвищується на 7 %.

У шостому розділі виконана розробка методів діагностування для забезпечення надійності й функціональної стабільності тягових властивостей колісних машин з використанням штучної нейронної мережі.

В основі запропонованої методології розв'язання задач контролю та діагностики технічного стану АТД використовується метод FDI (Fault Detection and Identification), заснований на порівнянні результатів вимірювань газодинамічних параметрів реального АТД з розрахунковими параметрами, обчисленими за його математичною моделлю.

В якості діагностичних ознак (входів НМ-2) використовувалася інформація за 11 параметрами роботи автотракторного двигуна: потужність, що розвивається двигуном ΔP ; температура охолоджувальної рідини ΔT_{OP} ; витрати повітря для згоряння палива ΔG ; тиск мастила Δp_M ; витрати палива Δg ; шум (детонація) $\Delta \psi$; тиск у кінці такту стиснення ΔC ; якість згоряння палива за вихлопним газом Δk ;

кількість картерних газів ΔS ; тиск газів у картері двигуна Δp_r ; кількість відключених циліндрів Δi .

При складанні навчальної вибірки враховувалося, що поява дефекту в автотракторному двигуні зазвичай пов'язано зі зміною геометричних розмірів частин ЦПГ, що призводить до зміни характеристик його вузлів і його термогазодинамічних параметрів. Так, зменшення ККД циліндро-поршневої групи і його ступеня стиснення, як правило, викликано закоксовуванням, зниженням пружності або поломками поршневих кілець, зношенням, або задирками дзеркала гільзи циліндра, а також руйнуванням підшипників ковзання, масляним «голодуванням», прогарами клапанів, або прокладки головки циліндрів. Зменшення ККД термогазодинамічних параметрів може бути обумовлено такими дефектами, як пізнішим запалюванням, забрудненням форсунок впорскування, паливних та повітряних фільтрів, внаслідок приготування бідної чи багатой суміші, забрудненням системи охолодження або нестачею охолоджувальної рідини в ній, а також порушенням регулювань у системі паливоподачі, тощо.

Виконано дослідження залежності ефективності діагностування АТД від числа штатних датчиків (вимірюваних параметрів). Для дослідження цього питання з урахуванням особливостей нейромережевої реалізації процедури діагностування використовувався метод головних компонентів. На основі коваріаційного аналізу даних було встановлено, що серед десяти вимірюваних параметрів в якості головних компонент можна виділити 7 параметрів: ΔP , ΔT_{op} , ΔG , Δg , ΔC , Δk , ΔS .

Використовувалися спеціальні вікна інтерпретатора, в якому інформація експертної системи про технічний стан механізмів автотракторного двигуна для обраного режиму функціонування виводиться у візуально-вербальному вигляді. У вікні перегляду експертної системи переглядають графічну інформацію про поведінку параметрів на режимі управління або режимі діагностування. У спеціальних рядках (табл. 4) виводяться різні повідомлення: види й найменування діагностичних параметрів, їх поточні значення, попередження про виникнення позаштатних ситуацій або досягненні параметрів критичних значень тощо.

Таблиця 4 – Вхідні та вихідні значення системи

| № | Вхідні значення | Позначення | Вихідні значення |
|----|--|---------------------|--|
| 1 | Потужність двигуна (кВт) | Потужність | Технічний стан автотракторного двигуна |
| 2 | Температура охолоджувальної рідини (°C) | Температура | |
| 3 | Витрата повітря (м ³ /км·год) | Повітря | |
| 4 | Тиск мастила (МПа) | Тиск | |
| 5 | Витрата палива (г/км·год) | Витрата | |
| 6 | Шум (дБ) | Шум | |
| 7 | Тиск в кінці такту стиснення (МПа) | Тиск такту | |
| 8 | Вихлопні гази (%) | Вихлопні гази | |
| 9 | Кількість картерних газів (л) | Кількість газів | |
| 10 | Тиск картерних газів (МПа) | Тиск газів | |
| 11 | Кількість відключених циліндрів (шт) | Відключені циліндри | |

Унікальною особливістю для контролю технічного стану ЦПГ є можливість діагностування автотракторних двигунів за допомогою нейронних предикторів. Нейронний предиктор (рис. 16) – це математична модель на базі штучної нейронної мережі, яка здійснює передбачення вихідного вектора стану виробу за його передісторією на один крок вперед. Для використання нейронного предиктора його необхідно навчити на даних, отриманих від справного автотракторного двигуна при його роботі в різних динамічних режимах, у тому числі й при відключенні частини циліндрів. При навчанні нейронна мережа апроксимує функціональну залежність між вхідними сигналами X і вихідними Y . В якості вхідних сигналів виступають напруги, отримані у штучній нейронній мережі (ШНМ) від датчиків, які є штатними в автотракторному двигуні, і додатково ті ж сигнали, затримані на деякий час. Вихідним сигналом є передбачений на один крок електричний струм в обмотці електромагніту нормально закритого електромагнітного клапана, який перенаправляє паливо в лінію зливу (рис. 9) та технічний стан автотракторного двигуна.

Після навчання нейронний предиктор підключається до автотракторного двигуна, що діагностується шляхом відключення частини циліндрів. Точність передбачення предиктора залежить від часу навчання, обсягу й якості навчальної вибірки.

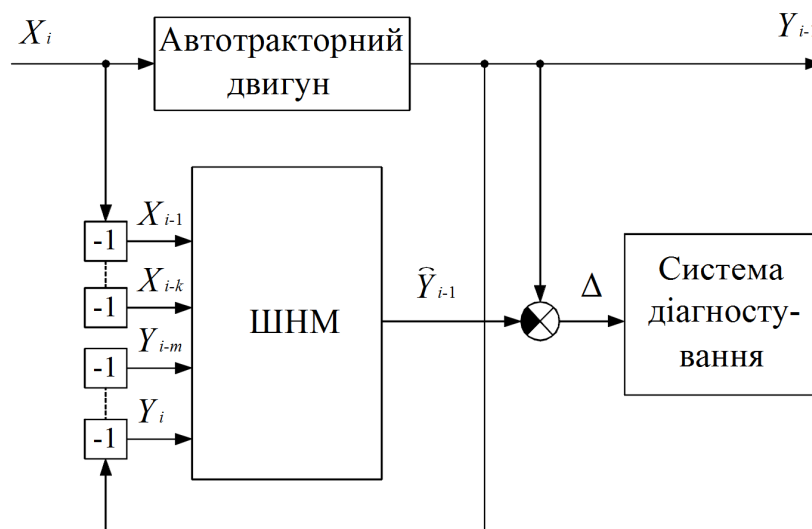


Рисунок 16 – Блок-схема нейронного предиктора

При справному автотракторному двигуні вихідний сигнал предиктора практично збігається з реально вимірним струмом, а в разі виникнення несправності виникає неузгодженість Δ . За величиною і знаком неузгодженості, а також швидкістю зміни величини неузгодженості можна проводити оцінювання технічного стану циліндро-поршневої групи автотракторного двигуна за допомогою періодичної зміни відключення пар циліндрів.

Таким чином, застосування методу планування експерименту дає можливість скоротити необхідну кількість навчальних експериментів для нейронної мережі 1 з 2048 до 10-15 для нейронної мережі 2 при забезпеченні достовірності результату розпізнавання рівною 91,2%.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі теоретично узагальнено та розроблено нові методи діагностування й оцінювання взаємозв'язку між кількістю відключених циліндрів АТД та енергоперетворюючими властивостями, що дозволило вирішити наукову проблему забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин при русі в режимі відключення частини циліндрів двигуна. Це дозволило отримати нові наукові результати та зробити практичні рекомендації.

1. Аналіз останніх досягнень і публікацій в області оцінювання стабільності функціонування колісних машин показав, що потрібні нові підходи до підвищення ефективності їх використання в умовах малих навантажень і обертів. Проблемі надійності й функціональної стабільності колісних машин в умовах відключення частини циліндрів АТД приділено недостатню увагу. Встановлено, що використання штучних нейронних мереж, нечіткої логіки, експертних систем в процесі діагностування АТД дозволяє підвищити точність і якість оцінювання динамічних процесів.

2. Отримана залежність кількості відключених циліндрів від миттєвого значення ефективної потужності. Встановлено, що відключення частини циліндрів найбільш ефективно на холостому ході та при малих навантаженнях моторно-трансмісійних установок колісних машин, при цьому визначено максимальну кількість відключених циліндрів за умовами забезпечення потрібної ефективної потужності АТД та надійності його складових частин. Для визначення максимальної кількості відключених циліндрів запропоновано алгоритм роботи штучної нейронної мережі з використанням даних штатного бортового комп'ютера.

3. Дослідженням встановлено вплив зниження тиску у лініях високого тиску палива на стан підтискних пружин електромагнітних клапанів, що встановлені поза межами порожнин високого тиску, що дозволило застосувати менш потужні електромагніти та пружини. Отримані результати можуть бути використані для відключення подачі палива в окремі циліндри, що сприяє його економії та з'являється можливість діагностики несправностей при роботі циліндрів.

4. Отримана залежність величини падіння потужності на ведучих колесах машини при відключенні частини циліндрів їх двигунів з урахуванням наявності або відсутності механічних (насосних) втрат у відключених циліндрах. Падіння потужності на ведучих колесах автомобіля Daewoo Lanos 1.5i при відключенні одного або двох циліндрів двигуна з урахуванням наявності механічних (насосних) втрат у відключених циліндрах склала відповідно в 1,56 раз та в 3,82 рази. Усунення механічних (насосних) втрат знижує падіння потужності відповідно до 1,44 разів та до 2,98 раз. Падіння потужності на ведучих колесах автомобіля КраЗ-255Б при відключенні двох або чотирьох циліндрів двигуна з урахуванням наявності механічних (насосних) втрат у відключених циліндрах склала відповідно в 1,44 рази та в 6,97 раз. Усунення механічних (насосних) втрат знижує падіння потужності відповідно до 1,1 разів та до 3,09 разів.

5. Експериментально встановлено, що для автомобіля Daewoo Lanos 1.5i при

відключенні одного або двох циліндрів при наявності та відсутності механічних (насосних) втрат максимальна різниця значення потужності в діапазоні швидкостей $V_{\text{авт}}=2-13$ м/с (при русі на другій передачі) складала відповідно $\Delta N_{\text{max}}=1890$ Вт та $\Delta N_{\text{max}}=2694$ Вт, що складає 4,3 % та 6,1 % від максимального значення потужності на колесах. Для автомобіля КрАЗ-255Б при відключенні двох або чотирьох циліндрів при наявності та відсутності механічних (насосних) втрат максимальна різниця значення потужності в діапазоні швидкостей $V_{\text{авт}}=1-5$ м/с (при русі на другій передачі) складала відповідно $\Delta N_{\text{max}}=19917$ Вт та $\Delta N_{\text{max}}=27437$ Вт, що складає 22,3 % та 30,8 % від максимального значення.

6. Розроблений метод оцінювання надійності базових деталей АТД за втомною міцністю при відключенні частини циліндрів. Обґрунтований критерій – коефіцієнт запасу міцності при відключенні частини циліндрів дозволив розробити метод оцінювання безвідмовності базових деталей АТД при відключенні частини циліндрів. Виконаний прогноз розвитку тріщин, які виникають на поверхні блоку циліндрів АТД внаслідок нерівномірності крутильного моменту, дозволив оцінити ризик втрати працездатності.

7. Встановлено кореляційний зв'язок механічного ККД та ефективної потужності двигуна: зі збільшенням кількості відключених циліндрів (факторна ознака) в АТД, збільшується потужність механічних втрат (результативна ознака) та зменшується механічний ККД. Розроблений метод дозволяє визначити вплив відключення будь-якої кількості циліндрів на показники потужності та паливно-економічні показники роботи автотракторного двигуна. За допомогою отриманого рівня потужності для суміщених режимів коливань при діагностуванні встановлено, що при відключенні половини циліндрів: номінальна потужність становить 35-40 %, розбіжність експериментальних і розрахункових результатів коефіцієнта зміни потужності механічних втрат не більше 8 %; розбіжність розрахункових і експериментальних результатів коефіцієнта навантаження за потужністю не більше 5 %; механічний ККД при завантаженні на 48 % підвищується на 7 %.

8. Експериментально встановлено, що з поступовим відключенням частини циліндрів виникають додаткові насосні витрати. Так, на стенді у двигуна КамАЗ-740 при збільшенні частоти обертання колінчастого вала від 1400 хв^{-1} до 2400 хв^{-1} та при номінальній потужності $N_{\text{ном}} = 154,5$ кВт, потужність механічних втрат збільшилася від 42,65 кВт до 118,1 кВт, або на $\Delta N_{\text{мв}} = 75,45$ кВт, а після усунення насосних втрат у першому, четвертому, шостому та восьмому циліндрах із зростанням частоти обертання вала двигуна в тих же межах – від 36,65 кВт до 104,25 кВт, або на $\Delta N_{\text{мв}} = 67,6$ кВт.

9. Отримана математична модель зміни основних техніко-економічних показників автотракторного двигуна при роботі колісних машин в різних умовах навантаження. Так, при номінальній частоті обертання на холостому ходу двигуна розбіжність щодо зміни витрати палива складає 8,78 %, при роботі під навантаженням у точці нульової економії розбіжність за коефіцієнтом завантаження становить 2,1 %, витрати палива 14 %. При русі порожньої колісної машини

зниження витрати палива зростає із збільшенням швидкості; розбіжність при швидкості 10 км/год складає 22 %. При роботі з вантажем при завантаженні колісної машини 1 т при швидкості 10 км/год на розбіжність становить 22 %. Таким чином, отримані залежності дозволяють зробити висновок про задовільну адекватність математичної моделі.

10. Удосконалено інтелектуальну бортову систему з використанням штучної нейронної мережі. Запропоновані нейромережеві технології для вирішення задач діагностування технічного стану автотракторного двигуна дозволили працювати як з реальними даними, отриманими для індивідуального і еталонного (середньостатистичного) автотракторного двигуна, так і з даними, обчисленими за допомогою його математичної моделі, на підставі порівняння яких можна приймати обґрунтовані рішення про характер і місце розташування того чи іншого дефекту. Рекомендований до використання алгоритм виявлення несправностей циліндро-поршневої групи, що є результатом роботи штучної нейронної мережі, та здійснюється з використанням результатів аналізу діагностичних параметрів автотракторного двигуна.

11. Рекомендації, які розроблені з використанням результатів теоретичних і експериментальних досліджень забезпечення надійності та функціональної стабільності колісних машин в умовах режиму відключення частини циліндрів двигуна та діагностування з використанням штучної нейронної мережі прийняті для практичного використання державними авторемонтними підприємствами «Харківський завод спеціальних машин» та «Харківський автомобільний завод» концерну «УкрОборонПром», публічним акціонерним товариством «АвтоКрАЗ», м. Кременчук, акціонерним товариством «Харківський тракторний завод», приватним акціонерним товариством «Спецбудмаш» м. Бровари, лабораторією діагностування й технічного обслуговування Національного наукового центру «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» Української академії аграрних наук.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Подригало М.А. Керованість та стійкість тракторів і тракторних поїздів / М.А. Подригало, О.С. Полянський, Е.О. Дубінін, А.О. Молодан, В.В. Задорожня, М.П. Холодов, О. І. Хворост // Монографія. – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2018. – 279 с.

2. Тарасов Ю.В. Оценка эффективности рециклинга транспортных средств, вышедших из эксплуатации / Ю.В. Тарасов, А.А. Молодан // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков: ХНАДУ, 2016. – Вып. 72. – С. 7-12.

3. Полянський А.С. Нормирование диагностических параметров элементов двигателя / А.С. Полянський, А.А. Молодан // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (технічні науки). – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2017. – Вип. 180. – С. 142-148.

4. Полянський О.С. Підвищення паливної економічності колісних машин відключенням частини циліндрів двигуна / О.С. Полянський, А.О. Молодан, О.В. Власенко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2017. – № 9. – С. 57-61.

5. Полянський О.С. Зміна енергетичних параметрів двигуна в режимі роботи без навантаження при відключенні циліндрів / О.С. Полянський, А.О. Молодан // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (технічні науки). – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2018. – Вип. 190. – С. 152-161.

6. Молодан А.О. Вплив відключення частини циліндрів на режим роботи двигуна під навантаженням / А.О. Молодан // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (технічні науки). – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2018. – Вип. 192. – С. 151-158.

7. Полянський А.С. Совершенствование метода оценки технического состояния цилиндропоршневой группы / А.С. Полянський, А.А. Молодан // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2018. – № 13. – С. 27-32.

8. Подригало М.А. Применение модели многокомпонентного сложного движения для оценки энергетической эффективности автомобиля / М.А. Подригало, Р.О. Кайдалов, Д.В. Абрамов, А.А. Молодан, В.И. Гацько, А.С. Мазин // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – №1(10). – С. 73-78.

9. Коробко А. Зміна потужності і витрати палива двигуна колісної машини під час вимикання частини його циліндрів / А. Коробко, А. Молодан // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – ДНУ УкрНДПВТ імені Леоніда Погорілого. – Дослідницьке, 2018. – Вип. 22 (36). – С. 268-274.

10. Молодан А.А. Теоретические расчеты относительного дополнительного расхода топлива при отключении цилиндров / А.А. Молодан, А.С. Полянський // Інженерія природокористування. – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2018. – №2 (10). – С. 14-18.

11. Молодан А.О. Вплив на потужність двигуна колісної машини механічних втрат при відключенні циліндрів / А.О. Молодан // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки – Житомир: ЖДТУ, 2018. – №2 (82). – С. 105-110.

12. Молодан А. Основні підходи до надійності автотракторного двигуна з вимкненням циліндрів як складної системи / А. Молодан, А. Коробко // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – ДНУ УкрНДПВТ імені Леоніда Погорілого. – Дослідницьке, 2018. – Вип. 23 (37). – С. 52-60.

13. Молодан А.О. Зміна потужності автотракторного двигуна колісної машини з вимкненим циліндром / А.О. Молодан // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Х.: ХНТУСГ імені

Петра Василенка, 2018. – № 14. – С. 198-205.

14. Молодан А.О. Метод визначення додаткових витрат енергії викликаних нерівномірністю крутного моменту двигуна при відключенні циліндрів / А.О. Молодан // Вісник машинобудування та транспорту. – Вінниця: ВНТУ. – №2(8), 2018. – С. 65-73.

15. Молодан А.О. Діагностування потужності окремих циліндрів автотракторних двигунів методом їх відключення / А.О. Молодан // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (технічні науки). – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – Вип. 198. – С. 130-136.

16. Молодан А.О. Визначення потужності та роботи двигуна в процесі розгону колісної машини / А.О. Молодан // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (технічні науки). – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – Вип. 201. – С. 202-208.

17. Молодан А.О. Визначення залишкового напрацювання до відмови деталей двигуна з тріщиною з відключеними циліндрами / А.О. Молодан, О.С. Полянський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (технічні науки). – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – Вип. 205. – С. 103-109.

18. Молодан А.О. Підвищення енергетичної ефективності колісних машин методом відключення циліндрів в автотракторному двигуні / А.О. Молодан // Вісник машинобудування та транспорту. – Вінниця: ВНТУ. – №2(10), 2019. – С. 48-53.

19. Молодан А.О. Визначення потужності і роботи вимушених коливань при відключенні циліндрів в двигуні колісної машини / А.О. Молодан // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – №2(13). – С. 116-123.

20. Потапов Н.Н. Математическая модель скручивания вала трансмиссии полноприводных тягово-транспортных средств при движении с заблокированным приводом / Н.Н. Потапов, А.А. Молодан, А.С. Полянский // Інженерія природокористування. – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – № 4(14). – С. 6-11.

21. Дубинин Е. Совершенствование метода диагностирования рулевого управления шарнирно-сочлененной машины / Е. Дубинин, А. Полянский, А. Молодан, Д. Клец, В. Плетнёв // Motrol: Commission of motorization and energetics in agriculture; An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. Vol. 18, No 8. – Lublin. – Rzeszów, 2016 – P. 53-58. (Web of Science Core Collection).

22. Molodan A. Change of power and mechanical losses of a wheel vehicle engine with cylinders cutout / A. Molodan, O. Polyanskyi, M. Potapov. // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2018. Vol.20. No.1. P. 99-103. (Web of Science Core Collection).

23. Podrigalo, M. “The Improvement Brake’s Qualities of Vehicle by Developing the Method of the Choosing Frictional Pairs of the Brakes Mechanisms,” / Mikhail

Podrigalo, Dmytro Klets, Mykhailo Kholodov, Viktor Bogomolov, Anatoliy Turenko, Andrii Molodan, Volodymyr Rudzynskiy, Yurii Tarasov, Aloksa Mykolai, Vasyl Hatsko // SAE Technical Paper 2019-01-2145, 2019. Doi:10.4271/2019-01-2145. (Scopus Q2).

24. Podrigalo, M. «New Methods and Systems for Monitoring the Functional Stability Parameters of Wheel Machines Power Units» / Mikhail Podrigalo, Yevhen Dubinin, Andrii Molodan, Oleksandr Polianskyi, Mykhailo Kholodov, Dmytro Klets, Anton Kholodov, Zadorozhnia Viktoriia, Oleksandr Khvorost, Potapov Mykola, Alex Stepanov // SAE Technical Paper 2020-01-2014, 2020. Doi:10.4271/2020-01-2014. (Scopus Q2).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

25. Podrigalo M. Determination of the work done by the engine in the course of automobile movement / M. Podrigalo, D. Abramov, A. Molodan // “Транспорт, екологія – устойчиво развитие”: XXII научно-техническа конференция с международно участие, Сборник доклади. – Варна: Технически университет, 2016, 19-21 май. – С. 124-130.

26. Молодан А.О. Економія палива за рахунок визначення раціонального відключення циліндрів в двигуні / А.О. Молодан // «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців»: Наукові праці міжнародної науково-практичної та науково-методичної конференції присвяченої 85-річчю кафедри автомобілів, та 100-річчю з Дня народження професора А.Б. Гредескула, 20-21 жовтня 2016 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2016. – С. 149-150.

27. Полянский А.С. Выбор диагностических параметров оценки технического состояния колесных машин / А.С. Полянский, Д.М. Клец, Е.А. Дубинин, А.А. Молодан, М.А. Скорик // “Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення сил охорони правопорядку”: Збірник тез доповідей науково-практичної конференції, 27 жовтня 2016 р. – Харків: Національна академія національної гвардії України, 2016. – С. 111-113.

28. Молодан А.О. Освоєння технічних дисциплін студентами за допомогою ІТ-технологій / А.О. Молодан, Ю.В. Тарасов // Матеріали науково-методичних конференцій: ”Особливості викладання фахових дисциплін технічних спеціальностей – виклики часу та перспективи”, 21 березня 2017 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2017. – С. 34-35.

29. Абрамов Д. Визначення похибки вимірювання прискорення автомобіля акселерометром під час руху дорогою з поздовжнім ухилом / Д. Абрамов, А. Коробко, Ю. Тарасов, А. Молодан // 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозіуму 18–19 травня 2017 року. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2017. – С. 87-88.

30. Molodan A. The study of possible fuel savings when disconnecting cylinders / A. Molodan // “Транспорт, екологія – устойчиво развитие”: XXIII научно - техническа конференция с международно участие, Сборник доклади. – Варна: Технически университет, 2017, 15-17 Юни. – С. 350-354.

31. Молодан А.О. Визначення роботи автотракторного двигуна при включенні-виключенні циліндрів / А.О. Молодан, Д.В. Абрамов // Чотирнадцята наукова конференція ХНУПС імені Івана Кожедуба: "Новітні технології – для захисту повітряного простору". – Тези доповідей 11-12 квітня 2018 р. – Харків: Харківський національний університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2018. – С. 343-344.

32. Молодан А.О. Рациональне використання потужності двигуна при відключенні циліндрів / А.О. Молодан, Ю.В. Тарасов // Матеріали всеукраїнського науково-практичного семінару: "Наукові досягнення в галузі автомобільного транспорту", 20 квітня 2018 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2018. – С. 19.

33. Молодан А.О. Зміна роботи двигуна колісної машини при відключенні циліндрів / А.О. Молодан // Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції: «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», 25 – 26 квітня 2018 р. – Полтава, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2018. – С. 84-85.

34. Polyanskii A. New approach to technical maintenance and repair of autotractor technics / A. Polyanskii, A. Molodan // "Транспорт, екологія – устойчиво развитие": XXIV научно -техническа конференция с международно участие, Сборник доклади. – Варна: Технически университет, 2018, 14-16 Юни. – С. 109-115.

35. Молодан А.О. Вплив методу відключення частини циліндрів на показники двигунів колісних машин / А.О. Молодан // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції: "Новітні технології розвитку автомобільного транспорту", 16-19 жовтня 2018 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2018. – С. 202-204.

36. Подригало М.А. Поняття функціональної стабільності гальмових властивостей колісних транспортних засобів / М.А. Подригало, Ю.В. Тарасов, І.О. Радченко, А.О. Молодан // "Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів": Збірник тез доповідей науково-практичної конференції, 31 жовтня 2018 р. – Харків: Національна академія національної гвардії України, 2018. – С. 136-137.

37. Тарасов Ю.В. Підвищення ефективності і довговічності деталей циліндро-поршневої групи відремонтованих дизелів / Ю.В. Тарасов, А.О. Молодан, В.Д. Булавін, В.В. Гончаров, М.Ю. Шульга // Секція 2. «Технічне та тилове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи»: Збірник тез доповідей науково-практична конференції, 14 березня 2019 р. – Харків: Національна академії Національної гвардії України, 2019. – С. 166-167.

38. Polyanskii A. Influence on the engine power and flow fuel of the wheel car of the cylinder parts disconnection / A. Polyanskii, A. Molodan, N. Potarov. // Транспорт, екологія – устойчиво развитие": XXV научно-техническа конференция с международно участие, Сборник доклади. – Варна: Технически университет, 2019, 16-18 Май. – С. 160-165.

39. Молодан А.О. Ефективність нейронно-мережових моделей в системах діагностики технічного стану двигунів на основі функціональної адаптації / А.О. Молодан, О.В. Власенко, В.Д. Булавін // «Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів»: Матеріали всеукраїнського науково-практичного семінару, 22 травня 2019 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2019. – С. 16-17.

40. Молодан А.О. Використання нейронно-мережових моделей при діагностиці ДВЗ / А.О. Молодан, А.С. Устінов, В.В. Гончаров // «Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів»: Матеріали всеукраїнського науково-практичного семінару, 22 травня 2019 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2019. – С. 19-20.

41. Молодан А.О. Контроль і діагностика технічного стану двигунів на основі інтелектуального аналізу даних / А.О. Молодан, В.К. Вязеленко, М.Ю. Шульга // «Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів»: Матеріали всеукраїнського науково-практичного семінару, 22 травня 2019 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2019. – С. 23.

42. Полянський О.С. Методика розрахунку еквівалентних напружень в тріщинах деталей двигуна з відключеними циліндрами / О.С. Полянський, А.О. Молодан // «Проблеми надійності машин»: збірник матеріалів міжнародної науково-методичної конференції присвяченої пам'яті академіка В.Я. Аніловича. – Харків: Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2019. – С. 15-16.

43. Молодан А.О. Підвищення енергетичної ефективності колісних машин методом відключення циліндрів в автотракторному двигуні / А.О. Молодан // «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту»: матеріали XII міжнародної науково-практичної конференції, 21-23 жовтня 2019 року: збірник наукових праць / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 122-125.

44. Молодан А.О. Використання штучних нейронних мереж в діагностуванні потужності окремих циліндрів автотракторних двигунів при їх відключенні / А.О. Молодан, О.С. Полянський, О.В. Власенко, А.С. Устінов, В.К. Вязеленко // «Безпека на транспорті – основа ефективної інфраструктури: Проблеми та Перспективи»: Наукові праці IV Міжнародної науково-практичної конференції, 26-27 листопада 2019 р. – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2019. – С. 213-215.

45. Polyanskii A. Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders / A. Polyanskii, A. Molodan, N. Potapov. // Транспорт, екологія – устойчиво развитие”: XXVI научно -техническа конференция с международно участие, Сборник доклады. – Варна: Технически университет, 2020, 8-10 Октомври. – С. 132-137.

46. Тарасов Ю.В. Оцінка залишкового напруження до відмови деталі з тріщиною в двигуні з відключеними циліндрами / Ю.В. Тарасов, А.О. Молодан, О.В. Власенко, В.К. Вязеленко, А.С. Устінов // «Актуальні питання забезпечення

службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів»: Збірник тез доповідей ІХ всеукраїнської науково-практичної конференції, 29 жовтня 2020 р. – Харків: Національна академія Національної гвардії України, 2020. – С. 306-308.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

47. Пат. 143315 Україна, МПК F02D 41/32, F02M 63/02. Система відключення паливоподачі за допомогою електромагнітних клапанів / Молодан А.О., Полянський О.С., Подригало М.А., Дубінін Є.О., Клец Д.М., Потапов М.М., Абрамов Д.В.; заявник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u 2020 00007; заявл. 02.01.2020; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 14.

АНОТАЦІЯ

Молодан А.О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми забезпечення надійності та функціональної стабільності колісних машин в умовах режиму відключення частини циліндрів двигуна з урахуванням їх динамічних властивостей та діагностування з використанням штучної нейронної мережі. Визначено додаткові втрати енергії двигуна на рух колісної машини, обумовлені збільшенням нерівномірного крутильного моменту при відключенні частини циліндрів. Визначена динаміка зміни ефективної потужності й роботи двигуна при розгоні з відключенням частини циліндрів. Розвинуто метод оцінювання технічного стану двигуна колісної машини з використанням штучної нейронної мережі та визначеністю можливості відключення частини циліндрів. Проведені експериментальні дослідження зміни потужності на колесах машини при відключенні одного або декількох циліндрів двигуна. Розвинуто метод оцінювання надійності базових деталей двигуна в напрямку визначення впливу збільшення нерівномірності крутильного моменту при відключенні частини циліндрів.

Ключові слова: колісна машина, надійність, функціональна стабільність, динамічність, автотракторний двигун, потужність, відключення циліндрів, нерівномірність роботи, циліндро-поршнева група, експлуатація.

АННОТАЦИЯ

Молодан А.А. Научные основы обеспечения надежности и функциональной стабильности колесных машин в режиме отключения части цилиндров. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Харьковский

национальный автомобильно-дорожный университет, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы обеспечения надежности и функциональной стабильности колесных машин в условиях режима отключения части цилиндров двигателя с учетом их динамических свойств и диагностирования с использованием искусственной нейронной сети. Определены дополнительные потери энергии двигателя на движение колесной машины, обусловленные увеличением неравномерности крутящего момента при отключении части цилиндров. Определена динамика изменения эффективности мощности и работы двигателя при разгоне с отключением части цилиндров. Разработан метод оценки технического состояния двигателя колесной машины с использованием искусственной нейронной сети и определенностью возможности отключения части цилиндров.

Предложенная система отключения топливоподачи имеет усовершенствованные процессы отключения цилиндров автотракторного двигателя, учитывающие моменты снижения давления в линиях высокого давления топлива и контроль состояния поджимных пружин электромагнитных клапанов, установленных вне их полостей высокого давления, что позволило использовать менее мощные электромагниты и пружины.

Усовершенствован метод определения дополнительных потерь энергии двигателя, обусловленных наложением вынужденных и собственных колебаний моторно-трансмиссионных установок колесных машин с помощью функции Меандра в направлении использования гармонического момента и с использованием рядов Фурье.

Обосновано использование метода определения мощности механических потерь и энергии на насосные ходы в результате повышения неравномерности крутящего момента при отключении части цилиндров в двигателе, который учитывает изменение температурного режима в отключенном цилиндре.

Обосновано допустимое количество отключенных цилиндров, которое может приводить не только к снижению мощности колесной машины, но и к снижению надежности его работы. Разработан метод оценки надежности базовых деталей двигателя в направлении оценки влияния увеличения неравномерности крутящего момента при отключении части цилиндров.

Предложены нейросетевые технологии для решения задач диагностирования технического состояния автотракторного двигателя. Их внедрение позволяет работать как с реальными данными, полученными для индивидуального и эталонного (среднестатистического) автотракторного двигателя, так и с данными, рассчитанными с помощью математической модели, на основании сравнения которых можно принимать обоснованные решения о характере и месте расположения того или иного дефекта. Это позволяет повысить функциональную стабильность колесной машины и улучшить работу ее интеллектуальных бортовых систем.

Рекомендован к использованию алгоритм выявления неисправности цилиндра-поршневой группы, что является результатом работы искусственной нейронной сети, осуществляемой с использованием результатов анализа

диагностических параметров автотракторного двигателя.

В качестве входных сигналов выступают напряжения, полученные от датчиков, которые являются штатными в автотракторном двигателе. По результатам анализа, формируется выходной сигнал на устройство отключения подачи топлива и результат оценки технического состояния автотракторного двигателя колесной машины.

Проведены экспериментальные исследования определения изменения мощности на колесах машины при отключении одного и более цилиндров двигателя.

Практическое значение полученных результатов подтверждено внедрением предложенных методов и подходов при проведении опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ, а именно: метод повышения энергетической эффективности автотракторного двигателя колесной машины путем отключения части цилиндров с учетом обеспечения необходимых динамических свойств, надежности и функциональной стабильности.

Ключевые слова: колесная машина, надежность, функциональная стабильность, динамичность, автотракторный двигатель, мощность, отключение цилиндров, неравномерность работы, цилиндро-поршневая группа, эксплуатация.

ABSTRACT

A. Molodan. Scientific foundations of the reliability process and functional stability of wheeled vehicles in the shutdown mode of a part of cylinders. – Qualification scientific work. Manuscript copyright.

Thesis for obtaining the scientific degree of the Doctor of Technical Sciences, specialty 05.22.20 – operation and maintenance of vehicles. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific problem of reliability process and functional stability of wheeled vehicle in the conditions of shutdown mode of a part of cylinders of the engine taking into account their dynamic features and of diagnosis using an artificial neural network. Additional losses of engine energy on wheeled vehicle movement caused by increase in uneven torque at shutdown of a part of cylinders are defined. The dynamics of change of effective power and work of the engine at dispersal with shutdown of a part of cylinders is defined. A method for assessing the technical condition of the engine of a wheeled vehicle using an artificial neural network and the ascertaining the capabilities of shutdown of a part of cylinders have been developed. Experimental studies are made of the power change on the vehicle wheels when shutdown one or more engine cylinders. A method has been developed for evaluating the reliability of the main components of the engine with a view to determining the effect of increasing the unevenness of torque when shutdown of a part of cylinders.

Key words: wheeled vehicle, reliability, functional stability, dynamicity, automobile and tractor engine, power, cylinder shutdown, uneven operation, cylinder-piston group, operation.

Підписано до друку 05.04.2021 р. Формат 60×84¹/₁₆.
Умов. друк. арк. 2,3. Папір офсетний. Наклад 100 прим. Зам. № 174

КП «Міська друкарня»
м. Харків, 61002, вул. Алчевських, 44.
Свідоцтво про державну реєстрацію
серія ДК, № 5495, від 22.08.2017 р.