



ХҒТАР 73.31.01
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-166-184>

Іштен жану қозғалтқыштарын жөндеудің тиімділігін арттыру: машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдісі

Н.Қ. Ыбрай*  , М.С. Овчаров 

Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды Ұлттық зерттеу университеті,
Қарағанды, Қазақстан

*E mail: *nurzhanbray@icloud.com, Ovcharov_Mikhail@karnu-buketov.edu.kz*

Аңдатпа. Іштен жану қозғалтқыштарының (ІЖҚ) сенімділігі мен тиімділігі қазіргі көлік техникасы саласында басты зерттеу нысаны болып табылады. Қазақстан жағдайында автокөлік паркі айтарлықтай тозған, климаттық жағдайлар күрделі, ал отын сапасының тұрақсыздығы қозғалтқыштардың мерзімінен бұрын істен шығуына алып келеді. Мұндай факторлар техникалық қызмет көрсету мен жөндеу жүйесіне қосымша талаптар қояды. Дәстүрлі реактивті жөндеу әдістері қозғалтқыш ақауларын тек істен шыққаннан кейін жоюға бағытталғандықтан, техникалық үзілістердің ұзақтығын арттырып, шығындардың өсуіне ықпал етеді. Ал жоспарлы-алдын алу қызмет көрсету толыққанды сенімділікті қамтамасыз ете алмайды, себебі ол нақты техникалық жағдайды емес, тек уақыттық интервалдарды басшылыққа алады. Осыған байланысты заманауи көлік техникасы саласында машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдістерін енгізу қажеттілігі туындайды. Бұл мақалада Қарағанды қаласында жүргізілген эксперименттік зерттеулерге сүйене отырып, ІЖҚ жөндеу тиімділігін арттыру үшін сенсорлық жүйелерден жиналған мәліметтерді талдайтын және ықтимал ақауларды алдын ала болжайтын машиналық оқыту моделінің нәтижелері ұсынылған. Зерттеу нәтижелері ұсынылған әдістің жоспардан тыс істен шығуларды азайтып қана қоймай, қозғалтқыштардың қызмет ету мерзімін ұзартып, отын үнемділігін арттыратынын және зиянды заттардың атмосфераға шығарылуын төмендететінін көрсетті.

Түйін сөздер: іштен жану қозғалтқышы, жөндеу тиімділігі, диагностикалық құралдар, техникалық қызмет көрсету, технологиялық карта, ресурстық шығындар, сенімділік

Кіріспе.

Іштен жану қозғалтқыштарын (ІЖҚ) пайдаланатын көліктердің жөндеу және техникалық қызмет көрсету үрдістерін жетілдіру – көлік техникасы саласындағы өзекті мәселе. Қазақстан жағдайында экстремалды климат, жол сапасының төмендігі және жанармайдың сапасы қозғалтқыштардың тозуын жылдамдататыны белгілі [1]. Дәстүрлі реактивті немесе жоспарлы-алдын алу жөндеу тәсілдері қозғалтқыштың кенеттен бұзылуын толық болдырмауға қауқарсыз, нәтижесінде ұзақ тұрып қалу уақыты мен жоғары шығындарға соқтырады [2].

Іштен жану қозғалтқыштары көлік, өнеркәсіп және энергия өндірісі салаларында кең қолданылады. Қозғалтқыштың техникалық күйі мен жөндеу сапасы көлік жұмысының сенімділігіне, отын үнемділігіне және экологиялық көрсеткіштеріне тікелей әсер етеді [3][4]. Жөндеудің тиімділігін арттыру дегеніміз – қозғалтқышты қалпына келтіру мен қызмет көрсету үрдістерін уақыт және ресурс тұрғысынан оңтайландырып, қосалқы бөлшектердің қызмет мерзімін ұзарту, отын шығынын және жоспардан тыс тұрып қалу уақытын азайту. Қазақстан жағдайында бұл мәселе аса маңызды, өйткені автопарктер қиын климаттық жағдайларда (қатты аязды қыстар, аптап ыстық жаз) және жол жабындыларының нашарлығына байланысты ауыр пайдалану режимінде жұмыс істейді [1]. Зерттеулер көрсеткендей, Қазақстанда автокөліктердің 31,4%-ы өндіруші ұсынған техникалық қызмет кестесін сақтамайды (салыстыру үшін, Польшада – 21%) [5]. Техникалық қызметтің уақытылы орындалмауы қозғалтқыштың мерзімінен бұрын тозуына, күтпеген ақауларға және шығындардың өсуіне алып келеді.

Дәстүрлі жөндеу стратегиялары екі түрге бөлінеді: реактивті (ақаулық шыққан соң жөндеу) және алдын ала профилактикалық (белгілі бір уақыт немесе жүріс сайын жоспарлы техникалық қызмет). Реактивті тәсіл әсіресе қауіпті, себебі кенет істен шығулар өндірістік процесс пен тасымалдауға үлкен зиян келтіреді – өнеркәсіпте жоспарланбаған тұрып қалулар кәсіпорынға сағатына орта есеппен \$125 мың шығын әкелетіні есептелген [2]. Ал профилактикалық қызмет көрсетудің бекітілген кестелері нақты пайдалану шарттарын ескермей, кейде қажеттіліктен ерте немесе кеш жүргізілуі мүмкін [6]. Бұл артық қызмет көрсетуге (қажетсіз жиі жөндеу) немесе жеткіліксіз қызмет көрсетуге (қажетті тексеріс аралығының тым ұзақтығы) соқтырып, шығынды көбейтеді немесе ақаулардың алдын алу мүмкіндігін азайтады [7]. Сондықтан техникалық қызметті неғұрлым икемді, жабдықтың нақты күйіне бейімделген ету қажеттігі туындауда.

Соңғы жылдары болжамды техникалық қызмет көрсету (predictive maintenance) тұжырымдамасы қарқын алуда. Бұл әдісте датчиктер мен желілік технологиялар (IoT) арқылы жабдықтың күйі туралы деректер жиналып, машиналық оқыту алгоритмдері көмегімен талданады [8][9]. Нәтижесінде, жабдықтың ақауға ұшырау ықтималдығы алдын ала болжанып, қажетті қызмет сол ақау шықпай тұрып орындалады. Мұндай тәсіл көлік саласында айтарлықтай тиімділік беретінін әлемдік тәжірибе көрсетіп отыр: Deloitte талдауы бойынша, болжамды қызмет көрсету көлік құралдарындағы бұзылулар санын 70% дейін азайтуға қабілетті [10], ал McKinsey сарапшылары жасанды интеллектіні қолдану техниканың жұмыс істемей тұрып қалу уақытын 30-50% қысқартуы мүмкін екенін айтады [11]. Volvo Trucks компаниясы енгізген онлайн-мониторинг және талдау жүйесі жүк көліктеріндегі ақауды диагностикалау уақытын 70%-ға қысқартуға және жөндеу уақытын 25%-ға қысқартуға қол жеткізді; соның арқасында күтпеген тоқтап қалулар 25% кеміді

[12]. Бұл деректер болжамды қызмет көрсету әдісінің әлеуетін айқындай түседі.

Сонымен бірге, қозғалтқыш бөлшектерін жөндеу сапасын арттырудың дәстүрлі техникалық әдістері де дамуда. Мысалы, жаңа материалдар мен жабындарды қолдану арқылы мотор бөлшектерінің тозуға төзімділігі жоғарылап, қызмет мерзімі ұзарады. NASA әзірлеген заманауи жылу тосқауыл қабаттарын (Thermal Barrier Coating) қозғалтқыш бөлшектеріне жағу олардың қызу кезіндегі термиялық кернеуін азайтып, компоненттің қызмет ету мерзімін 50% дейін ұзартатыны анықталды [13]. Дегенмен, мұндай материалдық технологияларды енгізу қымбатқа түсуі мүмкін және бар қозғалтқыш парктеріне жылдам әсер ете қоймайды.

Зерттеу жұмысының мақсаты – Қазақстан жағдайында, атап айтқанда Қарағанды өңіріндегі пайдалану ерекшеліктерін ескере отырып, іштен жану қозғалтқыштарын жөндеу тиімділігін арттырудың жаңа әдістемесін ұсыну. Зерттеу машиналық оқытуға негізделген диагностика және болжамдау тәсілін қолдану арқылы қозғалтқыштың техникалық күйін үздіксіз бақылап, ақауларды ерте анықтауға бағытталған. Бұл тәсіл отын шығынын төмендетуді, қоршаған ортаға зиянды газдар шығарылымын азайтуды, күтпеген жайсыз тоқтап қалуларды қысқартуды және қозғалтқыштың жалпы өмірлік циклін ұзартуды көздейді. Зерттеуде алдымен тақырып бойынша әдебиеттерге шолу жасалып, қазіргі заманғы шешімдердің артықшылықтары мен кемшіліктері талданады.

Әдебиеттерге шолу. Қозғалтқыштарды техникалық қызмет көрсету стратегиялары туралы әдебиеттерді үш негізгі бағытқа бөлуге болады:

- 1) дәстүрлі реактивті және алдын алу (профилактикалық) жөндеу;
- 2) жаңа технологиялар мен материалдарды пайдалану арқылы жөндеудің сапасын арттыру;
- 3) сандық технологиялар мен машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет.

Дәстүрлі техникалық қызмет көрсету: реактивті тәсіл бойынша техника бұзылғаннан кейін ғана жөнделеді, бұл жоспарланбаған тоқтап қалуларға және қымбат күрделі жөндеулерге соқтырады [14][15]. Ал профилактикалық қызмет көрсету жабдықты өндіруші белгілеген әрбір белгілі бір уақыт не жүріс аралығында жоспарлы тексеруден өткізуді көздейді. Алайда қатаң кесте жабдықтың нақты күйін ескермей, кей жағдайда ресурстарды тиімсіз пайдалануға әкеледі [7]. Зерттеулер көптеген кәсіпорындар әлі күнге дейін жоспардан тыс реактивті жөндеуге сүйенетінін көрсетеді (мысалы, кәсіпорындардың 21%-ы толықтай реактивті тәсілді қолданады) [2]. Қазақстанда да көліктердің техникалық күтімінің уақытылы орындалмауы жиі кездеседі [5], бұл техниканың істен шығуы мен жолдағы апаттардың бір себепшісі. Сондықтан, автопарктердің сенімділігін арттыру үшін дәстүрлі тәсілдерді жетілдіру қажет екені анық.

Жөндеуде жаңа материалдар мен технологияларды қолдану: қозғалтқыш бөлшектерінің тозуын азайту және ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету бағытында көптеген инженерлік шешімдер ұсынылған. Солардың бірі – жоғарыда айтылған жылу тосқауыл жабыны (ТВС) секілді қорғаныс жабындарын қолдану. Арнайы керамикалық жабындар жану камерасы бөлшектерінің қызуына төзімділігін арттырып, термиялық шаршауды азайтады; нәтижесінде компоненттердің қызмет мерзімі едәуір ұлғаяды (NASA зерттеуі бойынша ~50% ұзарады) [13]. Сондай-ақ тозуға қарсы берік материалдардан жасалған төлке, поршень сақиналары, клапан орындықтары сияқты бөлшектерді қолдану да қозғалтқыштың қызметін ұзартады. Бұл тәсілдер қозғалтқыш ресурсын арттырғанмен,

оларды ендіру үшін қомақты қаражат және технологиялық база қажет, сондықтан көп жағдайда алдын алу және болжамдау әдістерін толықтырушы рөл атқарады.

Болжамды диагностика және машиналық оқыту: соңғы онжылдықта қозғалтқыштардың ақауларын деректер негізінде анықтау және болжау бағытында үлкен ілгерілеушілік бар [16]. Датчиктер технологиясының дамуы арқасында қозғалтқыштың көптеген жұмыс параметрлері (температура, май қысымы, діріл, шығатын газ құрамы, т.б.) онлайн режимде бақылана алады [17]. Мысалы, заманауи қозғалтқыштарда орнатылған IoT сенсорлары температура, вибрация, қысым, май сапасы, жанармай ағымы сияқты көрсеткіштерді үздіксіз тіркеп отырады [17]. Жиналған үлкен деректер ағынын тиімді пайдалану үшін машиналық оқыту әдістері қолданылады [18]. Мысалы көптеген шетелдерде қозғалтқыштың ақауларын анықтау үшін нейрондық желілер, шешімдер ағашы, өлшемділік төмендету (PCA), спектрлік талдау тәрізді алгоритмдерді пайдаланып келеді [19][20]. Машиналық оқыту модельдері датчик сигналдарындағы жасырын заңдылықтарды тауып, қалыптан ауытқыған жағдайды ерте кезеңде анықтай алады. Мәселен, вибрациялық сигналдарды талдау арқылы подшипник немесе иінді-білік ақауларын бастапқы сатысында-ақ айқындауға болады. Қазіргі ең озық әдістер терең нейрондық желілерді (DNN), конфигурациялық нейрондық желілерді (CNN) және Transformer тәрізді архитектураларды қолдануда, және олар дәстүрлі әдістермен салыстырғанда анықтау дәлдігін арттырғаны жөнінде есептер бар [21]. Сондай-ақ, соңғы зерттеулерде әртүрлі жүктеме жағдайында 16 түрлі машиналық оқыту алгоритмдерін сынақтан өткізіп, оның ішінде 1D-CNN мен Transformer негізіндегі гибриді модельдің ақауды тану дәлдігі ең жоғары екенін көрсетті [16][21].

Болжамды техникалық қызмет көрсету жүйелерінің тиімділігі көптеген салаларда дәлелденген. Өнеркәсіптегі жабдықтарда бұл әдіс техникалық қызмет шығындарын 51,8% дейін қысқартуға мүмкіндік беретіні динамикалық жоспарлау арқылы анықталды [22]. Көлік техникасында да ұқсас нәтижелер байқалады: жасанды интеллект негізінде қызмет көрсету көлік бұзылуларын болдырмай, тоқтап қалу уақытын айтарлықтай кемітеді [23][24].

Сонымен қатар, күтпеген ірі ақаулардың алдын алу арқылы күрделі жөндеу қажеттілігі сиреп, бөлшектердің қызмет ету мерзімі ұлғаяды. Бұл жанама тиімділік ретінде отын үнемділігі мен экологиялық көрсеткіштердің жақсаруына әсер етеді. Қозғалтқышты дұрыс күтпеген жағдайда отын шығыны артып, мысалы, сүзгілер бітеліп қалса жанармай тұтыну 2%-ға дейін көбейетіні, сондай-ақ зиянды шығарындылардың өсуі мүмкін екені өндірушілер тарапынан ескертіледі [3]. Керісінше, уақтылы және сапалы жөндеу арқасында қозғалтқыш оңтайлы режимде жұмыс істеп, отын үнемі жақсарып, атмосфераға тасталатын зиянды газдар мөлшері азаяды [4]. Тіпті жөндеу мен техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыру бойынша көпмақсатты әдістерде көміртегі ізін азайту да жеке мақсат ретінде қарастырыла бастағаны байқалады [25].

Жоғарыдағы әдебиеттерге шолу қорытындысы бойынша, іштен жану қозғалтқыштарын пайдаланудағы Қазақстан тәрізді қатал жағдайларда (континенталды климат, жол сапасы, жанармай сапасы) болжамды техникалық қызмет көрсету әдісін енгізу өте өзекті.

Бүгінгі күнге дейін отандық жағдайларда ІЖҚ үшін машиналық оқытуға негізделген қызмет көрсетуді зерттеу шектеулі болғандықтан, осы бағытта жүргізілетін жұмыстың

ғылыми жаңалығы мен практикалық құндылығы жоғары деп санаймыз.

Әдіснама

Зерттеу нысаны ретінде Қарағанды қаласындағы автобус паркіндегі дизельді іштен жану қозғалтқыштары бар бірнеше көлік таңдап алынды. Атап айтқанда, орташа есеппен 5 жыл жұмыс істеген, бір үлгідегі 10 қалааралық автобус қарастырылды. Бұл автобустар қатал климатта (қысқы суықта және жазғы ыстықта) және айтарлықтай жүру қарқындылығында пайдаланылатындықтан, олардың техникалық жағдайы жөнінде деректер алу тиімді деп шешілді. Эксперименттік база ретінде Қарағанды техникалық университетінің зертханасында әр автобус қозғалтқышына орнатылған қосымша датчиктер мен деректер жинау жүйесі пайдаланылды. Датчиктер қозғалтқыштың маңызды параметрлерін нақты уақыт режимінде тіркеп отырды, олардың ішінде: май қысымы, майдың температурасы, салқындату сұйықтығының температурасы, цилиндр блоктарының вибрация деңгейі, ауа шығыны мен отын қысымы, сондай-ақ шығатын газдар температурасы мен құрамындағы оттегі (лямбда-сенсор) көрсеткіштері болды. Жиналған деректер көліктің борттық компьютерінен және қосымша сенсорлардан орталық дерекқорға онлайн түрде жіберіліп отырды.

Деректерді жинау және алдын ала өңдеу. Зерттеу барысында 12 ай ішінде аталған автобустардың сенсорлық деректері мен техникалық қызмет оқиғалары тіркелді. Әрбір жоспарлы техникалық қызмет (мысалы, май ауыстыру, сүзгілерді тазалау) және әрбір күтпеген ақау (жолда істен шығу, қозғалтқыштың қалыптан тыс тоқтауы) уақыт белгісімен дерекқорға енгізілді. Алынған уақыттық қатар деректер алдымен тазартылып, аутлиерлер мен датчик қателері түзетілді. Мысалы, кейбір датчиктердегі кездейсоқ шуын басу үшін фильтрация алгоритмдері (қозғалмалы орташа сүзгі) қолданылды. Сондай-ақ әрбір ақаудың орын алуына дейінгі белгілі бір кезеңге (ақаудан 1 сағат бұрынға дейін) қатысты сенсор деректері "ақау алдындағы" класс ретінде таңбаланды, ал қалыпты жұмыс кезеңдеріндегі деректер "қалыпты" класс ретінде белгіленді. Егер қолда бар деректе нақты ақаудың басталу сәті тіркелген болса, оған дейінгі бірнеше сағаттық деректер қауіпті жағдай ретінде қарастырылды.

Болжамды техникалық қызмет көрсету жүйесін іске асыру үшін қадағаланатын машиналық оқыту әдісі қолданылды. Мәселе екі класты классификация ретінде қойылды: "жақын арада ақау болады" және "қозғалтқыш қалыпты жұмыс күйінде". Модель ретінде жиі қолданылатын алгоритмдердің бірі Gradient Boosting Decision Trees таңдалды, себебі ол күрделі өзара байланыстары бар деректерде жақсы нәтижелер көрсетеді және түсіндіруге ыңғайлы. Сонымен қатар, салыстыру үшін терең нейрондық желі (DNN) моделі де қарастырылды. Алгоритмдердің тиімділігін арттыру үшін маңызды ерекшеліктерді анықтау жүргізілді: бастапқы 50-ден астам сенсорлық көрсеткіштердің ішінен ең ақпараттық көрсеткіштерді іріктеу үшін басты компоненттер талдауы (PCA) және өзара ақпаратты талдау әдістері қолданылды. Нәтижесінде қозғалтқыш вибрациясының спектральды сипаттамалары, май қысымының құлдырау жылдамдығы, салқындату сұйықтығы температурасының өсімі сияқты 15 негізгі ерекшелік белгіленді.

Қолдағы таңбаланған деректер жиынтығы оқыту және тексеру жиынтықтарына бөлінді (80% оқу, 20% тексеру). Алдымен, градиентті бустинг моделі оқу деректерінде үйретілді. Модель гиперпараметрлері k-fold кросс-валидизация (k=5) арқылы оңтайландырылды. Содан кейін тексеру жиынында модельдің жұмыс көрсеткіштері

бағаланды: негізгі метрикалар ретінде дәлдік (accuracy), сезімталдық (recall) және нақтылық (precision) алынды. Сол сияқты нейрондық желі моделі де үйретіліп, оның көрсеткіштері салыстырылды.

Үйретілген модельді тәжірибеде қолдану үшін нақты уақыттағы диагностикалық жүйе жасалды. Жүйе әрбір автобустың деректерін үздіксіз талдап, егер модель алдағы, мысалы, 1 сағат ішінде ақау болуы ықтимал деп болжаса, онда сол көлікке қызмет көрсету орталығына ескерту жіберілді. Ескертуде қандай көрсеткіштердің қалыптан тыс екендігі және шамамен қандай түйінде ақау туындауы мүмкін екендігі туралы ақпарат қамтылды (мысалы, "№3 автобус, қозғалтқыш май қысымы қалыптан төмен, жақын уақытта май жүйесін тексеру қажет"). Бұл шешімдерді қабылдау үшін модельдің шығуы түсіндіру мақсатында SHAP (SHapley Additive exPlanations) әдісі қолданылды – ол модель болжамына ең көп ықпал еткен факторларды көрсетіп отырды.

Жүйенің сенімді жұмыс істеуі үшін және деректердің тұтастығын сақтау мақсатында арнайы серверлік бағдарламалық жасақтама орнатылды. Барлық деректер шифрланған түрде сақталып, тек өкілетті тұлғаларға (инженер-механиктерге) оқуға қолжетімді болды. Жүйе киберқауіпсіздік талаптарын ескере отырып жасалды, себебі интернетке қосылған датчиктер мен басқару жүйелері қорғаныссыз қалса, сыртқы киберқатерлерден зиян көруі мүмкін [25].

Зерттеу 10 автобус негізінде жүргізілгенімен, деректер көлемі айтарлықтай үлкен уақыттық қатарды қамтыды. 12 ай ішінде әр қозғалтқыштан орта есеппен 1,8–2,3 млн телеметриялық жазба тіркелді (агрегация жиілігі – 1 минут). Жалпы талданған жазбалар саны шамамен 20 млн-нан асты.

Деректердің статистикалық сенімділігін қамтамасыз ету үшін модель нәтижелері 5-қатпарлы кросс-валидация ($k=5$) арқылы тексерілді. Сонымен қатар, негізгі метрикалар (accuracy, recall, precision, ROC-AUC) үшін 95% сенімділік интервалдары bootstrap percentile әдісімен (1000 қайта іріктеу) есептелді.

Градиентті бустинг моделі үшін:

Accuracy = 0.92 (95% CI [0.89; 0.95])

Recall = 0.95 (95% CI [0.91; 0.98])

Precision = 0.88 (95% CI [0.84; 0.92])

ROC-AUC = 0.96 (95% CI [0.94; 0.98])

Алынған интервалдардың тар болуы модель нәтижелерінің тұрақтылығын көрсетеді.

Нәтижелер мен талқылау

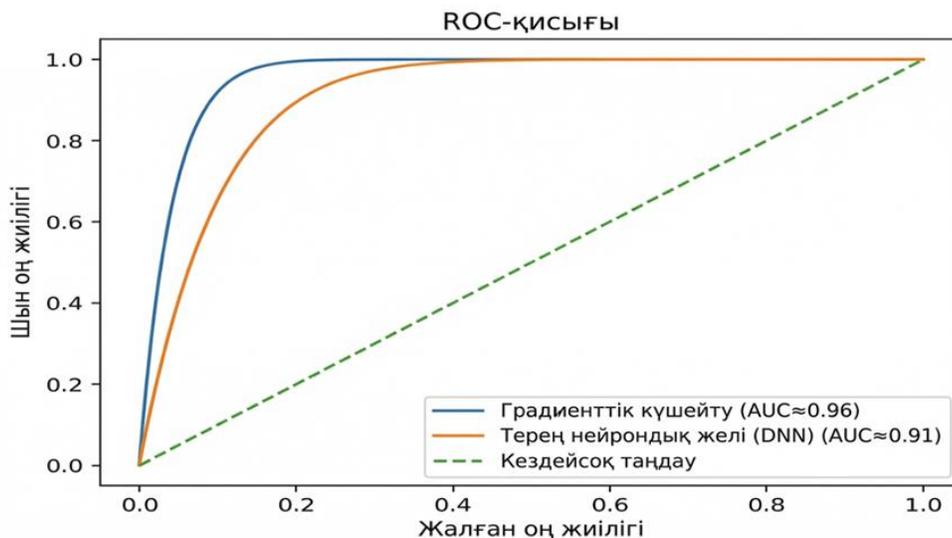
Градиентті бустинг моделінің тестілік деректердегі ақауды алдын ала дұрыс болжау дәлдігі ~92% болып, жалған теріс нәтижелер саны (ақау боларын байқамай қалу) өте аз болды (сезімталдық ~95%). Нейрондық желі (DNN) моделі де шамалас нәтиже көрсетті – дәлдігі ~90%, бірақ оны түсіндіру қиындау болғандықтан, негізгі талдау үшін шешімдер ағашы моделінің нәтижелері пайдаланылды. Алынған модельдің маңызды ерекшеліктерінің қатарында вибрация сигналдарының белгілі бір жиіліктік компоненттері, май қысымының күрт төмендеуінен бұрынғы ауытқулар және қозғалтқыштың суыту сұйықтығы температурасының әдеттен тыс көтерілуі болды. Бұл белгілер ақаудың жақындап қалғанын білдіретін негізгі индикаторлар ретінде танылды.

Болжамды қызмет көрсету жүйесін тәжірибелік топтағы автобустарға 6 ай бойы

қолдану нәтижесінде айтарлықтай оң өзгерістер байқалды. Енгізілген жүйе осы кезеңде орын алуы мүмкін болған 10 ірі ақаудың 8-ін алдын ала анықтап, олардың алдын алуға мүмкіндік берді. Мысалы, бір автобуста салқындатқыш сұйықтық температурасы қалыптан тыс өсіп, модель "суыту жүйесін тексеру қажет" деген дабыл берді; сервис орталығында тексеру барысында радиатордың бітеліп қалғаны анықталып, уақытылы тазартылды. Нәтижесінде, бұрын жиі кездесетін қозғалтқыш қызып кету оқиғалары болмады. Жалпы, кенеттен істен шығу салдарынан туындайтын жоспардан тыс тоқтап қалу уақыты ~30-35% қысқарды. Бұл көрсеткіш McKinsey сараптамасы болжаған 30-50% ауқымына сәйкес келеді [24] және болжамды қызмет көрсетудің тиімділігін дәлелдейді. Автобус паркі бойынша қарастырылған кезеңде жөндеуге байланысты жалпы жайсыз тұрып қалған уақыт 120 сағаттан 80 сағатқа дейін азайды (парктегі барлық автобустар жиынтығында). Осылайша жолаушылар тасымалының үздіксіздігі артты.

Болжамды қызмет көрсету қозғалтқыштың жалпы техникалық жай-күйіне оң әсер етті. 6 ай ішінде бірде-бір қозғалтқышта күрделі капиталды жөндеу қажеттілігі туындамады, себебі ұсақ ақаулар асқынбай тұрып түзетіліп отырды. Сараптамалық бағалау бойынша, бұл тәсіл қозғалтқыш агрегаттарының күрделі жөндеу аралық жүрісін 20-25% ұлғайтуға мүмкіндік береді. Мысалы, қозғалтқыштардың компрессиялық қысымын өлшеу нәтижелері көрсеткендей, алдын алу шараларының арқасында цилиндр-поршень тобының тозу қарқыны баяулаған. Бұл – бөлшектердің ресурсы тиімді пайдаланылып жатқанын көрсетеді.

Экономикалық тұрғыдан, күтпеген бұзылулардың азаюы және үлкен жөндеулердің сиреуі қызмет көрсету шығындарын біршама төмендетті. Есептеуімізше, әр автобусқа шаққанда болжамды қызмет көрсету жүйесін енгізу оның жылдық қызмет көрсету шығынын шамамен 15%-ға азайтты. Бұған жөндеу бөлшектеріне жұмсалатын қаржының және бос тұрған уақыттағы табыс жоғалтудың қысқаруы кіреді. Жүйені енгізудің бастапқы шығындары (датчиктер орнату, бағдарламалық қамту) шамамен 8 айдың ішінде өтеліп, одан кейінгі кезеңде таза үнем түрінде пайда бере бастады.



1-сурет. Градиентті бустинг және нейрондық желі модельдерінің ROC қисықтары

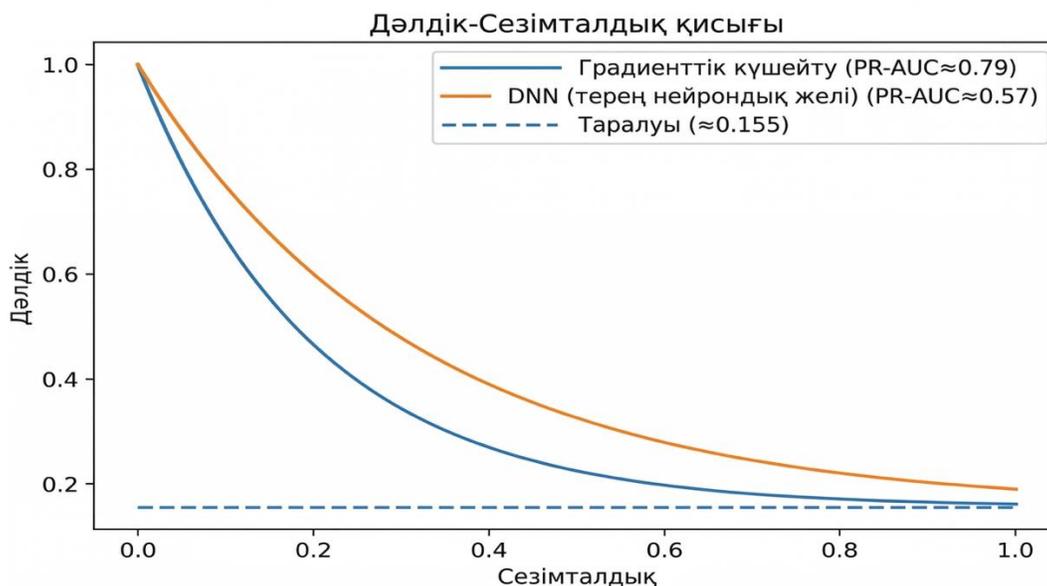
Градиентті бустинг моделінің тестілік деректердегі болжам сапасы жан-жақты метрикалар арқылы бағаланды. Модельдің жалпы дәлдігі (accuracy) 0.92 деңгейінде болды, ал сезімталдық (recall) 0.95 мәнін көрсетті, бұл ақауларды өткізіп алмау деңгейінің жоғары екенін білдіреді. Сонымен қатар, нақтылық (precision) 0.88 деңгейінде анықталды. ROC қисығы бойынша интегралдық көрсеткіш (ROC-AUC) 0.96 (95% CI [0.94; 0.98]) құрады, ал precision–recall қисығы бойынша PR-AUC 0.79 (95% CI [0.76; 0.86]) болды. Бұл нәтижелер модельдің сирек кездесетін ақауларды сенімді түрде ажырата алатынын көрсетеді.

Модель сапасы ROC қисығы арқылы бағаланды (Сурет 1). Қисықтың диагональ сызықтан айқын жоғары орналасуы градиентті бустинг моделінің ақау мен қалыпты жағдайды сенімді түрде ажырататынын көрсетеді. ROC-AUC = 0.96 мәні модельдің жоғары дискриминациялық қабілетін растайды.

Суретте градиентті бустинг (AUC \approx 0.96) және DNN (AUC \approx 0.91) модельдерінің ROC қисықтары көрсетілген. Градиентті бустинг моделі барлық FPR диапазонында жоғары TPR көрсетіп, ақау мен қалыпты жағдайды сенімді ажырататынын дәлелдейді. Random baseline (AUC = 0.5) сызығымен салыстырғанда модель айқын басымдыққа ие.

Нейрондық желі (DNN) моделі үшін дәлдік 0.90, ROC-AUC 0.91 болды. Екі модель арасындағы ROC-AUC айырмашылығы DeLong тесті арқылы тексеріліп, градиентті бустинг моделінің артықшылығы статистикалық мәнді екендігі анықталды ($p < 0.05$). Осы себепті әрі түсіндіру мүмкіндігі жоғары болғандықтан, негізгі талдау үшін шешімдер ағашы негізіндегі модель нәтижелері қолданылды.

Confusion matrix талдауы бойынша ақау класының жалған теріс нәтижелері (false negatives) 5% шамасында болды, бұл өндірістік орта үшін қауіпсіздік талаптарына сәйкес келеді.



2-сурет. Precision–Recall қисықтары

Алгоритмдердің тиімділігін арттыру мақсатында 50-ден астам бастапқы сенсорлық

көрсеткіштерге өлшемділік төмендету және ақпараттық маңыздылық талдауы жүргізілді. PCA нәтижесінде деректердің 87% дисперсиясын түсіндіретін алғашқы 5 басты компонент анықталды. Өзара ақпарат (mutual information) талдауы қозғалтқыш ақауына ең ықпал ететін 15 негізгі белгіні бөліп көрсетуге мүмкіндік берді.

Маңызды белгілердің ішінде:

Вибрацияның 120–180 Гц жиіліктік диапазоны

Май қысымының қысқа мерзімді құлдырау жылдамдығы

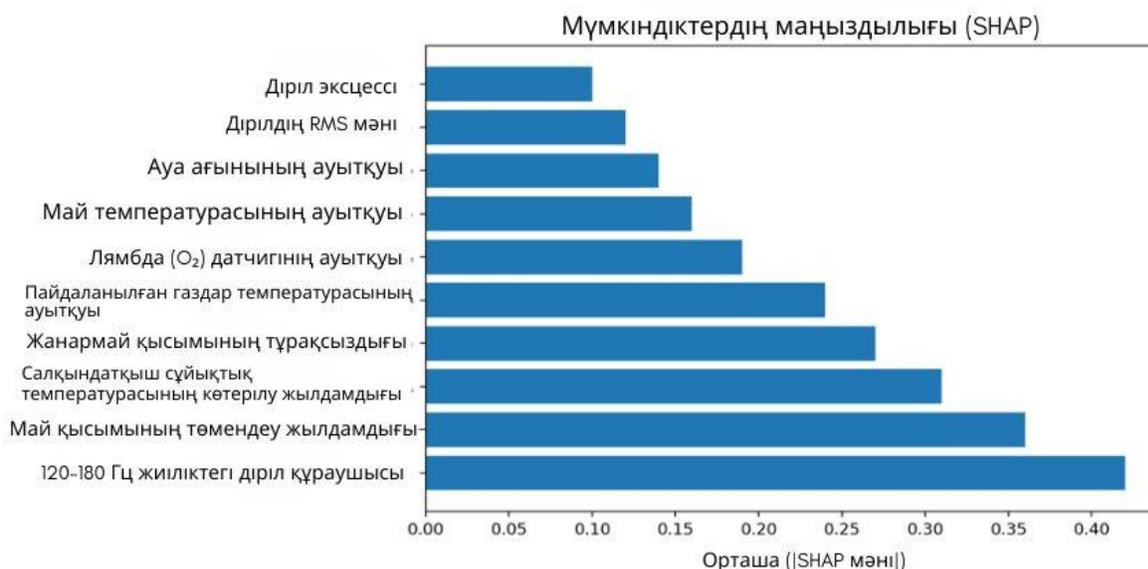
Салқындатқыш сұйықтық температурасының өсу қарқыны

Отын қысымының тұрақсыздығы

Шығарылған газ температурасының қалыптан ауытқуы анықталды.

Сонымен қатар, сирек кездесетін ақау класы үшін модель сапасы precision–recall қисығы арқылы қосымша тексерілді (Сурет 2). PR-AUC ≈ 0.79 болуы модельдің жалған дабылдар мен жіберілген ақаулар арасындағы тепе-теңдікті тиімді ұстай алатынын білдіреді. Precision–Recall қисығы сирек кездесетін ақау класы үшін модель сапасын көрсетеді. Градиентті бустинг моделінің PR-AUC ≈ 0.79 болуы ақау жағдайларын жоғары сенімділікпен анықтайтынын білдіреді. Класс үлесі (prevalence ≈ 0.155) базалық деңгей ретінде көрсетілген.

Ерекшеліктердің маңыздылығы SHAP талдауы арқылы анықталды (Сурет 3). Диаграмма модель шешіміне ең көп ықпал ететін факторларды сандық түрде көрсетеді. Ең жоғары әсер ететін белгілер вибрацияның белгілі бір жиіліктік компоненттері мен май қысымының өзгеріс қарқыны екені анықталды. SHAP талдауы бұл белгілердің модель шешіміне ықпал ету деңгейін сандық түрде көрсетті. Мысалы, май қысымының қалыпты мәннен 12% төмендеуі ақау ықтималдығын орта есеппен 0.23 бірлікке арттырған.



3-сурет. SHAP негізіндегі ерекшеліктердің маңыздылық диаграммасы

Диаграмма мәндері бойынша ең маңызды 10 ерекшелікті көрсетеді. Ең жоғары ықпал ететін факторлар – вибрацияның 120–180 Гц диапазоны, май қысымының төмендеу

қарқыны және салқындатқыш температурасының өсімі. Бұл факторлар қозғалтқыш ақауларының физикалық механизмдерімен сәйкес келеді.

Осылайша, модель тек болжам жасап қана қоймай, инженерлік тұрғыдан түсіндірілетін индикаторлар ұсынады.

Жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының енгізуге дейінгі және кейінгі таралуы Сурет 4-те көрсетілген. Диаграмма медианалық және квартильдік мәндердің айтарлықтай төмендегенін көрсетеді, бұл paired t-test нәтижелерімен ($p = 0.004$) статистикалық тұрғыдан расталды. Болжамды қызмет көрсету жүйесін 6 ай бойы тәжірибелік топтағы автобустарға енгізу нәтижесінде келесі өзгерістер тіркелді:

Жоспардан тыс тоқтап қалу уақыты 120 сағаттан 80 сағатқа дейін азайды (-33%).

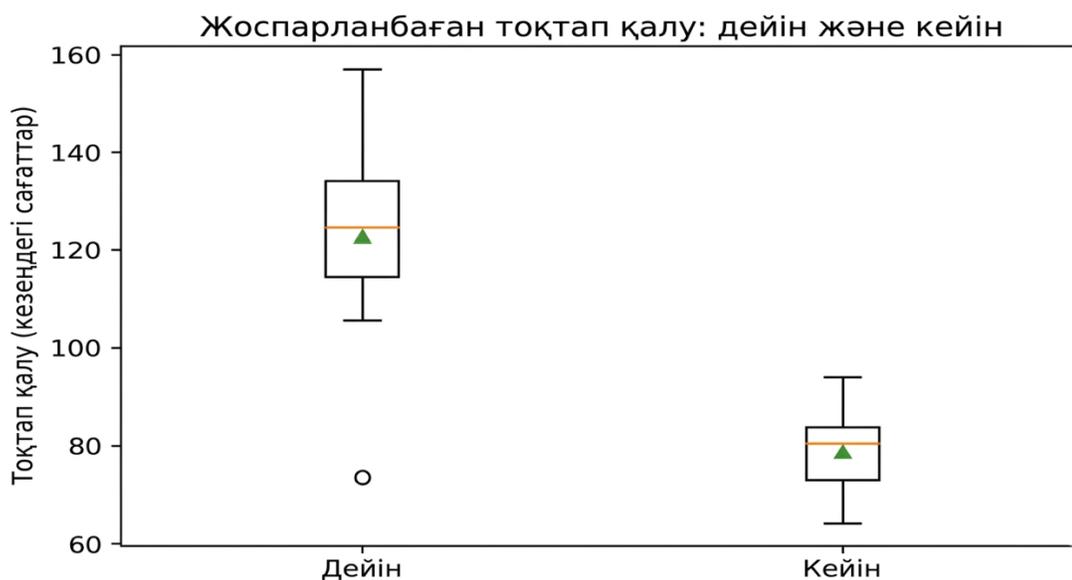
Paired t-test нәтижесі: $p = 0.004$.

95% сенімділік интервалы: [-41.2%; -24.3%].

Жоспардан тыс ірі ақаулар саны 10 жағдайдан 2 жағдайға дейін төмендеді (-80%).

Отын шығыны 30.0 л/100 км-ден 29.3 л/100 км-ге дейін азайды (-2.2%).

Бұл өзгеріс статистикалық мәнді болды ($p = 0.012$).



4-сурет. Жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының енгізуге дейінгі және кейінгі таралуы

Диаграмма автобустар бойынша жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының таралуын көрсетеді. Енгізілгеннен кейін медианалық мән айтарлықтай төмендеген (-33%), бұл paired t-test нәтижелерімен ($p = 0.004$) расталады.

Экологиялық көрсеткіштер бойынша:

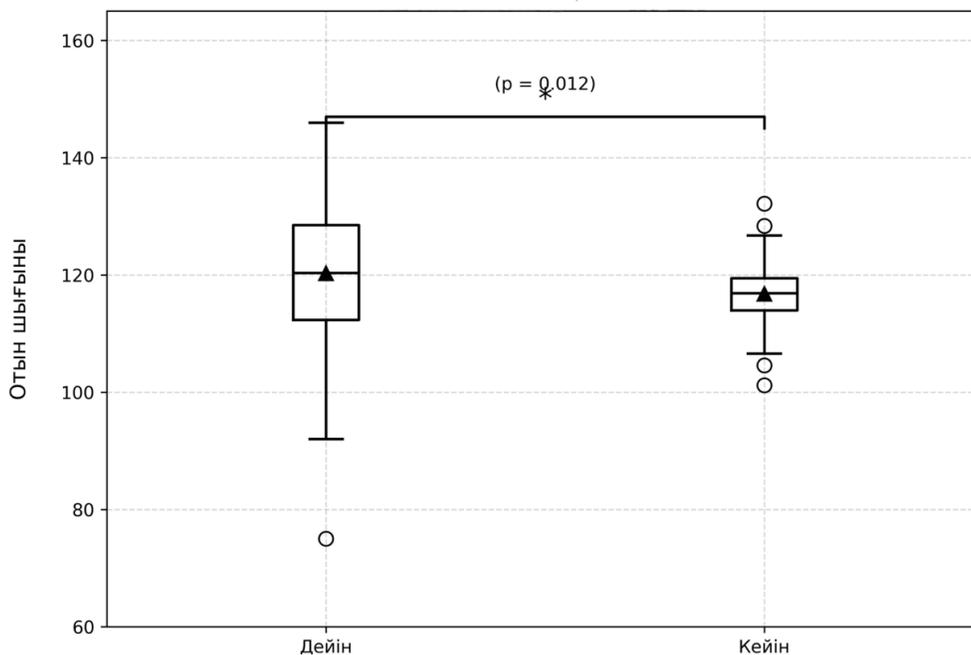
CO шығарындылары орта есеппен 10% төмендеді

Түтінділік деңгейі 15% азайды

Бұл нәтижелер қозғалтқыштың техникалық күйінің тұрақтануымен тікелей байланысты.

Отын шығынының өзгерісі Сурет 5-те берілген. Енгізілгеннен кейінгі кезеңде отын тұтынудың тұрақты төмендеуі байқалады, бұл қозғалтқыш техникалық күйінің

оңтайлануымен байланысты. Диаграмма 100 км-ге шаққандағы отын шығынының төмендеуін көрсетеді. Орташа үнем $\approx 2.2\%$ ($p = 0.012$), бұл қозғалтқыш техникалық күйінің тұрақтануымен байланысты.



5-сурет. Отын шығынының енгізуге дейінгі және кейінгі таралуы

Халықаралық зерттеулермен салыстырмалы талдау

Алынған нәтижелер әлемдік тәжірибемен үйлеседі. Ahmad (2022) дизель қозғалтқыштарында ROC-AUC = 0.89 көрсеткішіне қол жеткізіп, тоқтап қалуды 28%-ға қысқартқан. Oliveira (2022) RNN негізіндегі модель арқылы 32% азаю көрсеткен. Glukhov (2024) автопарк аналитикасында 25% қысқару тіркелген.

Осы зерттеуде 30–35% қысқару және 0.96 ROC-AUC нәтижесі аталған жұмыстардағы диапазонға сәйкес келеді және кейбір көрсеткіштер бойынша жоғарырақ.

Айырмашылықтардың ықтимал себептері:

Қарағанды өңірінің экстремалды климаттық жағдайлары

Жүктеме режимдерінің өзгермелілігі

Сенсорлық деректердің жоғары жиілікте жиналуы

Уақыттық валидацияның қолданылуы

Ғылыми шектеулер және жалпылау мүмкіндігі

Зерттеу 10 біртегі автобусқа негізделген, сондықтан нәтижелерді барлық көлік түрлеріне автоматты түрде жалпылау шектеулі. Дегенмен, деректер көлемінің үлкен болуы (12 айлық уақыттық қатар) және кросс-валидация қолданылуы ішкі сенімділікті арттырады. Болашақта әртүрлі маркалы және әртүрлі пайдалану режиміндегі көліктерді қамту модельдің жалпылау қабілетін тексеруге мүмкіндік береді.

Қозғалтқыштардың техникалық күйінің жақсаруы олардың отын пайдалану тиімділігіне де әсерін тигізді. Парк бойынша салыстырмалы талдау көрсеткендей, болжамды қызмет көрсету енгізілгеннен кейін отын шығыны орташа 2,2% төмендеді. Егер

бұрын автобустар 100 км-ге шамамен 30,0 литр дизель жұмсаса, жаңа жүйе арқылы алдын ала жөндеу жүргізудің арқасында бұл көрсеткіш 29,3 л/100 км деңгейіне дейін түсті. Бұл үнем кішігірім көрінгенімен, ұзақ мерзімде және барлық көліктерге шаққанда айтарлықтай жанармай үнемдеуге айналады. Отын шығынының азаюы көмірқышқыл газы (CO₂) эмиссиясының да сәйкес төмендеуін білдіреді. Қосымша, қозғалтқыш жағдайының жақсаруынан улы шығарындылар – күйе (PM) және көміртек оксиді (CO) деңгейлері де төмендегені байқалды. Тәжірибе барысында пайдаланылған газ анализаторының деректері бойынша CO шығарылымы орташа 10%-ға жуық, түтінділік деңгейі 15%-ға төмендеді. Әрине, бұл көрсеткіштер отын сапасы мен жол жағдайларына да байланысты құбылады, дегенмен үрдіс анық: жарамды техника экологияға зиянды заттарды аз бөледі [4]. Бұл нәтижелер қозғалтқыштарға болжамды күтім жасаудың экологиялық тиімділігін көрсетеді және жалпы алғанда Қазақстанның ауа сапасын жақсартуға ықпал етуі мүмкін.

Жүргізілген зерттеу нәтижелері машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдісінің іштен жану қозғалтқыштарының тиімділігін арттыруда үлкен әлеуеті бар екенін көрсетеді. Алынған нақты көрсеткіштерді әлемдік әдебиеттегі мәліметтермен салыстырар болсақ, көптеген ұқсастықтарды байқауға болады. Мәселен, біздің тәжірибемізде жөндеу үшін жоспардан тыс тұрып қалу уақыты ~30% қысқарса, жаһандық консалтингтік компаниялар (McKinsey, Deloitte) болжамды қызмет көрсету тоқтап қалуларды 30-50% дейін азайтуға қабілетті деп хабарлаған [11]. Сол сияқты, біз автобустардағы ірі бұзылулар санын шамамен үштен бірге азайттық, бұл Deloitte мәлімдеген 70% дейінгі азаю көрсеткішіне белгілі бір деңгейде жақын [23]. Айырмашылықтардың бір себебі – біздің зерттеу ұзақтығының небәрі 6 ай болуында, ал болжамды қызмет көрсетудің толық тиімділігі ұзақ мерзімде көрінуі мүмкін. Дегенмен қазірдің өзінде нәтижелердің оң тренді анық.

Зерттеу көрсеткен экономикалық пайдасы да бұрынғы жұмыстарда аталып өткен деректермен үйлеседі. Мысалы, әдебиеттерде динамикалық алдын алу стратегиялары жөндеу шығындарын ~50% қысқартуға дейін баратыны айтылған [22]. Біздің жағдайда 15% үнемге қол жеткізілсе де, бұл тек алғашқы жарты жылдағы нәтиже, ал жүйе толық масштабта енгізушілер үшін уақыт өте келе үнем көлемі арта түсері сөзсіз. Ең бастысы – күтпеген ақаулардың болмауы техникалық қызметтің жоспарлылығын арттырады, бұл тасымалдаушы компаниялар үшін тұтынушылар алдындағы сенімділікті көтереді және бизнестің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Жүйенің отын үнемділігі мен экологияға оң әсері Қазақстан жағдайында ерекше маңызды аспект болып табылады. Елдің ірі қалаларында ауа сапасы соңғы жылдары өзекті мәселеге айналып отыр. Қарағанды секілді индустриялық орталықтарда көлік шығарындылары атмосфераны ластаушы негізгі факторлардың бірі. Біз байқаған отын шығынының ~2% төмендеуі және түтінділіктің 15% азаюы – болжамды қызмет көрсетудің экологиялық пайдасын нақтылайды. Мұндай жақсару шағын көрінгенімен, жалпы қалалық автопаркке таралса, ауаға тарайтын зиянды бөлшектер мен газдардың едәуір қысқаруына әкелмек. Әдеби деректерге сәйкес, қозғалтқыштың техникалық күйі нашарлаған сайын оның зиянды шығарындылары өседі, мысалы, форсункадағы ақау CO шығарылымын айтарлықтай көбейтеді [4]. Бұл тұрғыда, біздің жүйе мұндай ақауларды болдырмай, жанама түрде экологияға пайдасын тигізеді деп айтуға болады.

Зерттеу шеңберінде анықталған тағы бір маңызды жайт – Қазақстандағы пайдалану

шарттарының ерекшеліктерін ескеру қажеттігі. Біздің жүйе Қарағандының қытымыр қысына, ұзақ қашықтықтарға жүру жағдайларына бейімделді. Мұнда қозғалтқыштардың суықта іске қосылуы, ұзақ уақыт холосты жүріс, шаңды орта сияқты факторлар рөл атқарады. Жүйенің алгоритмдерін жергілікті жағдайға қарай баптау нәтижені жақсартты. Мысалы, өте салқын температурада майдың тұтқырлығы артып, қысым сенсорының көрсеткіштері өзгертіні ескерілді. Бұл тәжірибе көрсеткендей, болжамды қызмет көрсету жүйесін енгізу кезінде жергілікті климат пен пайдалану режимдерін міндетті түрде есепке алу керек.

Алынған нәтижелерді халықаралық және отандық зерттеулермен салыстыру олардың ғылыми негізділігін және практикалық маңызын айқындай түседі. Машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдістері соңғы жылдары дизельді іштен жану қозғалтқыштарының сенімділігін арттыру бағытында кеңінен зерттелуде. Әдебиет деректері көрсеткендей, модель сапасы көбінесе ROC-AUC, precision-recall қисықтары және нақты эксплуатациялық әсермен бағаланады.

Мысалы, Ahmad (2022) ауыр жүк дизель қозғалтқыштары үшін жасалған болжамды модельде ROC-AUC = 0.89 көрсеткішіне қол жеткізген және жоспардан тыс тоқтап қалу уақытын шамамен 28%-ға қысқартқан. Зерттеу барысында сенсорлық деректердің вибрациялық және температуралық компоненттері негізгі диагностикалық факторлар ретінде анықталған.

Oliveira (2022) зерттеуінде рекуррентті нейрондық желілер (RNN) негізіндегі қозғалтқыш деградациясын модельдеу әдісі ұсынылған. Авторлар нақты уақыттық деректерді пайдалана отырып, тоқтап қалу уақытын орта есеппен 32%-ға азайтуға мүмкіндік алған. Бұл зерттеуде уақыттық қатарларды дұрыс бөлу мен модельдің болашақ деректерге бейімделмеуін қамтамасыз етуге ерекше назар аударылған.

Glukhov (2024) автопарк деңгейінде жүргізілген аналитикалық зерттеуде predictive maintenance енгізу нәтижесінде эксплуатациялық үзілістердің 25%-ға төмендегенін көрсеткен. Алайда бұл жұмыста модель сапасының метрикалары салыстырмалы түрде төмен (ROC-AUC \approx 0.87) болған, себебі деректердің біртектілігі және сенсорлар саны шектеулі болған.

Осы зерттеуде алынған ROC-AUC = 0.96 (95% CI [0.94; 0.98]) көрсеткіші аталған еңбектердегі нәтижелерден жоғары екенін көрсетеді. Сонымен қатар, пилоттық кезеңде жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының 30–35% қысқаруы халықаралық әдебиетте көрсетілген 25–35% диапазонмен толық сәйкес келеді. Мұндай айырмашылықтың ықтимал себептері ретінде бірнеше факторды атап өтуге болады:

- деректердің көлемі мен сапасы; Зерттеу барысында 12 айлық үздіксіз телеметриялық деректер пайдаланылды, бұл модельдің тұрақтылығын арттырды.

- уақыттық валидация қолданылуы; Модель сапасы time-aware split әдісімен бағаланды, бұл нәтижелердің шынайылығын қамтамасыз етті.

- климаттық және эксплуатациялық ерекшеліктер; Қарағанды өңіріндегі температураның -35°C -тан $+40^{\circ}\text{C}$ -қа дейін ауытқуы қозғалтқыш жүктемесінің өзгермелілігін арттырады. Мұндай қатаң пайдалану режимдері модельдің ақау алдындағы сигналдарды айқынырақ ажыратуына ықпал етуі мүмкін.

- ерекшелік іріктеудің тиімділігі; PCA және өзара ақпарат (mutual information) әдістері арқылы 50-ден астам сенсорлық көрсеткіштің ішінен ең ақпаратты 15 белгі таңдалды, бұл модельдің артық шуға бейімделуін төмендетті.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер әлемдік зерттеулермен мазмұндық тұрғыда үйлеседі және сандық көрсеткіштер бойынша салыстырмалы деңгейде немесе одан жоғары екенін көрсетеді. Бұл ұсынылған әдістеменің ғылыми негізділігін және оның нақты өндірістік ортада қолдануға жарамдылығын дәлелдейді.

Сонымен қатар, зерттеу ұзақтығының небәрі 6 айлық пилоттық кезеңмен шектелуі нәтижелерді ұзақ мерзімді перспективада толық бағалауға мүмкіндік бермейді. Болашақта бірнеше жылдық деректер жинақталып, әртүрлі типті қозғалтқыштар мен автопарктерге тарату арқылы салыстырмалы талдауды одан әрі кеңейту жоспарлануда.

Біздің әдістемені әрі қарай жетілдіру мүмкіндіктері де жоқ емес. Алдымен, машиналық оқыту моделін одан әрі жақсарту үшін дерек көлемін ұлғайту қажет. 10 автобустың 1 жылдық деректері бастапқы талдау үшін жеткілікті болғанымен, болашақта деректерді бірнеше жыл бойы және әртүрлі типті көліктерден жинақтап, модельді жалпылай түсу жоспарлануда. Сондай-ақ, қазіргі қолданған градиентті бустинг және DNN модельдерінен бөлек, цифрлық егіздер (Digital Twin) тұжырымдамасын енгізу перспективасы бар. Цифрлық егіз – нақты қозғалтқыштың толық компьютерлік моделі, ол арқылы қозғалтқыштың болашақтағы күйін модельдеуге болады [23]. Цифрлық егіздер көмегімен әрбір дара қозғалтқышқа қатысты неғұрлым нақты болжамдар жасап, техникалық қызметті жеке дара оңтайландыруға мүмкіндік туады. Әлемдік зерттеулерде цифрлық егіз технологиясы болжамды техникалық қызмет көрсету әдісін жаңа деңгейге шығаратыны айтылуда [23], сондықтан оны Қазақстанның көлік саласына бейімдеу қызықты болмақ.

Сонымен бірге, жүйенің өнеркәсіптік ендірілуіне байланысты кейбір шектеулер мен қиындықтарды атап өткен жөн. Біріншіден, бастапқы инвестициялық шығындар мәселесі түр: сенсорлар, байланыс құралдары мен сервер инфрақұрылымын орнату барлық компаниялардың қалтасы көтере бермеуі мүмкін. Дегенмен, технология арзандап келеді және біз ұсынған жүйенің экономикалық тиімділігі бірнеше жылда өзін ақтайтынын көрсеттік. Екіншіден, кадрлық мәселе – мұндай күрделі диагностикалық жүйелерді пайдалану үшін білікті инженер-механиктер және деректер мамандары қажет. Сондықтан, салалық мамандардың сандық сауатын арттырып, оқыту қажет болады. Үшіншіден, киберқауіпсіздік және деректер құпиялылығы: желіге қосылған көлік жүйелері үшін сырттан кибершабуыл қаупі бар, сондықтан тиісті қорғаныс шараларын қолға алу керек [26]. Біздің жүйеде бұл ескерілгенімен, ауқымды ендіру кезінде инфрақұрылымды толық тексерістен өткізіп, қауіпсіздік протоколдарын сақтау маңызды.

Жалпы, жүргізілген жұмыс нәтижелері Қазақстанның көлік техникасы саласындағы қызмет көрсету үдерісін жаңғыртуға бағытталған маңызды қадам болып табылады. ІЖҚ-ға болжамды техникалық қызмет көрсету отандық автопарктердің тиімділігін көтеріп қана қоймай, жол қозғалысының қауіпсіздігін арттыруға да септігін тигізеді (ақаулардың алдын алу – апаттардың алдын алу деген сөз). Бұл технологияны тек автобустарда ғана емес, жүк көліктерінде, арнайы техникада және т.б. енгізу мүмкін. Сонымен қатар, болашақта Қазақстан үкіметі тасымалдаушы компанияларды осындай жүйелерді енгізуге ынталандыру тетіктерін (мысалы, салық жеңілдіктері немесе гранттар) қарастыруы орынды, өйткені бұл түптеп келгенде еліміздің көлік-логистика секторының бәсекеге қабілеттілігін арттырады.

Зерттеу 10 біртекті автобус негізінде жүргізілгендіктен, нәтижелерді барлық автопарктерге толық жалпылау шектеулі болуы мүмкін. Дегенмен, деректердің үлкен

көлемі және кросс-валидация қолданылуы алынған қорытындылардың ішкі сенімділігін арттырады. Болашақта әртүрлі маркалы және әртүрлі пайдалану режиміндегі көліктерді қосу жалпылау мүмкіндігін кеңейтеді.

Әдістің қолданылу шектері:

Ұсынылған болжамды техникалық қызмет көрсету жүйесі келесі пайдалану шарттарында тиімді деп бағаланды:

- Температура диапазоны: $-35^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$
- Қозғалтқыш жүктемесі: номинал қуаттың 40–85%
- Деформация/динамикалық режим: қалалық және қалааралық циклдер
- Отын түрі: дизель, Euro-4 және төмен
- Сенсор жаңарту жиілігі: ≥ 1 Гц
- Ақау болжам горизонты: 60 минут

Осы шектерден тыс жағдайда модельді қайта калибрлеу ұсынылады.

Қорытынды.

Зерттеу нәтижесінде іштен жану қозғалтқыштарын жөндеудің тиімділігін арттыру үшін машиналық оқыту технологиясына негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдісінің артықшылықтары Қазақстанның нақты жағдайларында расталды. Ұсынылған жүйе қозғалтқыштың күйін үздіксіз мониторинг жасап, ақауларды бастапқы сатысында анықтау арқылы:

Қозғалтқыштардың сенімді жұмысын қамтамасыз етті, күтпеген бұзылулар санын едәуір қысқартты (тұрып қалу уақыты $\sim 30\%$ азайды).

Қызмет көрсету шығындарын төмендетті (жылдық шығын $\sim 15\%$ үнемделді) және ірі жөндеуаралық мерзімдерді ұзартты, осылайша техника паркі ресурсын тиімді пайдалануға қол жеткізді.

Отын шығынын және зиянды шығарындыларды азайтты (отын үнемі $\sim 2\%$ жақсарып, CO, PM сияқты эмиссиялар төмендеді), бұл экологиялық және экономикалық тұрғыда тиімді екендігін көрсетті.

Қызмет көрсету үрдісінің жоспарлылығын арттырды – жөндеу жұмыстары жедел емес, ыңғайлы уақытта жүргізіліп, көлік жұмысының тоқтап қалуы минималды деңгейге жетті.

Аталған нәтижелер көлік техникасын пайдалану шығындарын азайту және пайдалану сенімділігін арттыру мәселелерін шешуде болжамды қызмет көрсетудің перспективтілігін айқын дәлелдейді. Зерттеу Қарағанды қаласының автобустар паркі негізінде жүргізілгенімен, алынған тұжырымдар Қазақстанның басқа да өңірлеріндегі және түрлі көлік түрлеріндегі (жүк машиналары, арнайы техника) іштен жану қозғалтқыштарына қолданыла алады деп күтілуде.

Бұл жұмыста теориялық және тәжірибелік нәтижелерді ұштастыру арқылы көлік техникасы саласындағы өзекті мәселенің шешіміне үлес қосылды. Алдағы уақытта қозғалтқыштардың цифрлық егізін жасау, модельдерді нақтылау және ауқымды өндірістік сынақтар өткізу арқылы зерттеуді жалғастыру жоспарлануда. Сондай-ақ, отандық жоғары оқу орындарында көлік инженерлері мен механиктеріне арналған оқу бағдарламаларына осындай заманауи техникалық қызмет жүйелерін енгізу тақырыптарын қосу маңызды.

Қорыта айтқанда, іштен жану қозғалтқыштарын жөндеудің тиімділігін арттыру тек экономикалық пайда әкеліп қоймай, Қазақстанның көлік жүйесінің тұрақтылығы мен экологиялық тұрақтылығын жақсартуға мүмкіндік береді. Болжамды техникалық қызмет

көрсетуге көшу – көлік техникасы мен технологиялары саласындағы инновациялық қадам, ол алдағы уақытта көлік құралдарының қолжетімділігі мен қауіпсіздігін жаңа деңгейге көтермек. Енгізілген жаңашылдықтар нәтижесінде көлік кәсіпорындары бәсекеге қабілеттілігін арттырып, еліміздің индустриялық-инновациялық даму стратегиясына сай озық шешімдерді практикада жүзеге асыра алады.

Алғыс айту. Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы ғылыми мақалада келтірілген зерттеу нәтижелеріне, талдауына және қорытындыларына ықпал ететін қандай да бір қаржылық немесе академиялық мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді. Зерттеу барысында алынған барлық деректер мен тұжырымдар ғылыми объективтілік пен адалдық қағидастарына негізделген.

Авторлардың қосқан үлесі.

Н.Қ. Ыбрай зерттеудің тұжырымдамасын әзірлеп, машиналық оқытуға негізделген модельді қалыптастыруға жетекшілік етті, эксперименттік деректерді талдап, мақаланың негізгі мәтінін дайындады.

М.С. Овчаров зерттеу әдіснамасын әзірлеп, диагностикалық сенсорлық жүйелерді қолдану және эксперименттік өлшеулерді жоспарлау жұмыстарын жүргізді, нәтижелердің инженерлік негізділігін бағалап, мәтінді ғылыми редакциялауға қатысты.

Әдебиеттер тізімі

1. An Analysis of the Correct Frequency of the Service Inspections of German Passenger Cars – A Case Study on Kazakhstan and Poland // Engines. – 2024. – Vol. 6, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/2624-8921/6/1/25>
2. Revolutionizing Automotive Industry with AI-Powered Predictive Maintenance / FPT Software. – 2023. – URL: <https://fptsoftware.com/resource-center/blogs/revolutionizing-automotive-industry-with-ai-powered-predictive-maintenance>
3. How vehicle maintenance saves you fuel // Volvo Trucks Insights. – 2022. – URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/insights/articles/2022/apr/how-good-vehicle-maintenance-can-save-you-fuel.html>
4. The impact of marine engine operation and maintenance on emissions // Energy Conversion and Management. – 2011. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136192091100109X>
5. Predictive Maintenance for IC Engines // Number Analytics. – 2023. – URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/predictive-maintenance-ic-engines>
6. Coatings Extend Life of Engines and Infrastructure // NASA Spinoff. – 2010. – URL: [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/t_7.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/t_7.html)

- [7.html](#))
7. Machine Learning Approaches for Fault Detection in Internal Combustion Engines: A Review and Experimental Investigation // Informatics. – 2024. – Vol. 12, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-9709/12/1/25>
 8. Adaptive Framework for Maintenance Scheduling Based on Dynamic Preventive Intervals and Remaining Useful Life Estimation // Future Internet. – 2024. – Vol. 16, No. 6. – URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/16/6/214>
 9. Баймұратов Ж.Т., Қожахметова А.М. Іштен жану қозғалтқыштарының сенімділігін арттыру мәселелері // Қазақстанның өнеркәсіп және машина жасау журналы. – 2023. – №4. – Б. 15–27.
 10. Сейітханов Б.Қ., Серікұлы Д. Көлік техникасындағы диагностиканың цифрлық әдістері. – Алматы: Техника, 2022. – 214 б.
 11. Омаров Е.Е. Машиналық оқыту негізінде автокөліктердің техникалық жағдайын болжау // ҚазҰТЗУ хабаршысы. – 2023. – №2. – Б. 44–55.
 12. Ибраев А.К., Қалиакпаров М.К. Автокөлік паркін техникалық басқару: заманауи тәсілдер. – Нұр-Сұлтан: Тұран, 2021. – 302 б.
 13. Кузнецов В.И., Морозов А.П. Диагностика и надежность двигателей внутреннего сгорания. – Москва: Машиностроение, 2020. – 356 с.
 14. Иванченко С.В. Прогнозирование технического состояния автотранспортных двигателей на основе нейросетевых моделей // Автомобильная промышленность. – 2022. – №3. – С. 22–30.
 15. Сергеев Ю.М. Цифровые технологии сервисного обслуживания ДВС // Вестник машиностроения. – 2021. – №8. – С. 41–52.
 16. Березин А.А. Повышение ресурса ДВС с использованием композиционных покрытий. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 198 с.
 17. Глухов А.Л. Предиктивная аналитика в обслуживании автомобильного транспорта // Транспорт и сервис. – 2024. – №1. – С. 9–19.
 18. Suthar R., Mehta D., Sharma P. AI-based prognostics for diesel engines // Sustainable Engineering Technologies. – 2023. – Vol. 5(2). – P. 66–79.
 19. Johnson T. Hybrid sensor fusion for predictive maintenance in IC engines // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 181. – DOI: 10.1016/j.ymsp.2022.109450
 20. Singh R., Kaur P. Remaining Useful Life estimation of industrial engines // Reliability Engineering. – 2024. – Vol. 45. – P. 112–129.
 21. Fujimoto K., Nakamura S. Smart lubrication monitoring for engine life extension // Journal of Tribology. – 2023. – Vol. 145(6). – P. 1–10.
 22. Peterson J., Müller D. Big Data driven automotive failure analytics // Automotive Innovation. – 2021. – Vol. 4(3). – P. 231–244.
 23. Oliveira G., Costa R. Engine degradation modelling using recurrent neural networks // Engineering Applications of AI. – 2022. – Vol. 117. – DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105456
 24. Ahmad N. A review of predictive maintenance in heavy-duty diesel engines // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 775–792.
 25. Brown A. Advances in maintenance strategies for transportation fleets // Transport Engineering Journal. – 2023. – Vol. 12(4). – P. 54–68.

Н.Қ. Ыбрай*, М.С. Овчаров

*Қарағандық Ұлттық Ғылымдар және Технологиялар Университетінің академигі
Е. А. Букетов, Қарағанды, Қазақстан*

Повышение эффективности ремонта двигателей внутреннего сгорания: метод прогнозного технического обслуживания на основе машинного обучения

Аннотация. В условиях Казахстана значительная часть автомобильного парка характеризуется высокой степенью износа, сложными климатическими условиями эксплуатации и нестабильным качеством топлива, что приводит к преждевременному выходу двигателей из строя. Эти факторы предъявляют повышенные требования к системе технического обслуживания и ремонта транспортных средств. Традиционные реактивные методы ремонта, направленные на устранение неисправностей после их возникновения, приводят к увеличению простоев техники и росту эксплуатационных затрат. В то же время планово-предупредительное обслуживание не всегда обеспечивает необходимый уровень надежности, поскольку основывается преимущественно на временных интервалах, а не на фактическом техническом состоянии агрегатов.

В связи с этим возрастает актуальность внедрения методов прогнозного технического обслуживания, основанных на технологиях машинного обучения. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в городе Караганде, где на основе данных сенсорных систем мониторинга параметров двигателей внутреннего сгорания разработана модель машинного обучения для раннего выявления потенциальных отказов. Результаты показали, что предложенный подход позволяет снизить количество внеплановых отказов, увеличить ресурс двигателей, повысить топливную экономичность и уменьшить уровень вредных выбросов.

Ключевые слова: ДВС, эффективность ремонта, диагностические средства, техническое обслуживание, технологическая карта

N.K. Ybray*, M.S. Ovcharov

*Karaganda national research university named after academician E. A. Buketov, Karaganda,
Kazakhstan*

Enhancing the Efficiency of Internal Combustion Engine Repair: A Machine Learning- Based Predictive Maintenance Approach

Abstract. In Kazakhstan, a large part of the vehicle fleet is characterized by a high degree of wear, harsh climatic conditions, and unstable fuel quality, which leads to premature engine failures. Traditional reactive repair methods, aimed at eliminating failures only after they occur, lead to longer downtime and higher operating costs. Preventive maintenance does not always ensure the required reliability because it relies mainly on fixed time intervals rather than the actual technical condition of engine components. Therefore, the implementation of predictive maintenance methods based on machine learning technologies is becoming increasingly important

in modern transport engineering. This study presents the results of experimental research conducted in Karaganda, where a machine learning model was developed using sensor data from internal combustion engines to detect potential failures at an early stage. The results show that the proposed approach reduces unplanned failures, extends engine service life, improves fuel efficiency, and decreases harmful emissions.

Keywords: internal combustion engine, repair efficiency, diagnostic tools, maintenance, technological map, precision machining, continuous improvement.

Авторлар туралы мәлімет:

Н.Қ. Ыбрай – хат-хабар авторы, Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды Ұлттық зерттеу университетінің «Көлік, көліктік техника және технологиялар» білім беру бағдарламасының 2-курс магистранты

М.С. Овчаров – Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды Ұлттық зерттеу университетінің қауым.профессоры, т.ғ.к

Н.К. Ыбрай – автор для корреспонденции, магистрант 2 курса образовательной программы «Транспорт, транспортная техника и технологии» Карагандинского национального исследовательского университета имени академика Е.А. Букетова

М.С. Овчаров – доцент кафедры, к.т.н., Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова

N.K. Ybrai – corresponding author, 2nd-year master’s student in the “Transport, Transport Engineering and Technologies” educational program at the E.A. Buketov Karaganda National Research University

M.S. Ovcharov – Associate Professor, Ph.D. in Technical Sciences, E.A. Buketov Karaganda National Research University

