

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Підвищення ефективності експлуатації автобусів
вдосконаленням системи охолодження двигуна»**

Виконав: студент VI курсу групи Ат-63

Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Олег Сащук

(ім'я та прізвище)

Керівник: д.т.н., Дмитро Рубан

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 621.436-71:629.3.06

Сащук Олег Юрійович . «Підвищення ефективності експлуатації автобусів вдосконаленням системи охолодження двигуна»

//Кваліфікаційна робота. – Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025. – 63 с.

Дипломна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі — зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню надійності міських автобусів Богдан А092 (двигун Isuzu 4HK1-XS) шляхом модернізації системи охолодження.

У роботі проведено аналіз умов руху в міському циклі та виявлено недоліки штатного приводу вентилятора з в'язкісною муфтою, який не забезпечує ефективного тепловідводу в заторах та створює паразитне навантаження на двигун.

Обґрунтовано та розроблено нову конструкцію системи охолодження на базі двох електричних вентиляторів SPAL, встановлених у спроєктованому аеродинамічному дифузори. Розроблено мікропроцесорний блок керування на базі контролера Arduino Nano, який реалізує алгоритм ПІД-регулювання температури (ШИМ) та функцію захисту турбокомпресора від теплового удару після зупинки двигуна (After-cooling).

Розрахункова економія палива становить 0,8 л/100 км, що забезпечує річний економічний ефект у розмірі 26 960 грн на один автобус при терміні окупності 6 місяців.

Рис. 7, табл. 8, бібліогр. джерел 20.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ СУЧАСНИХ АВТОБУСІВ	10
1.1 Аналіз умов експлуатації автобусів у міському циклі та їх вплив на тепловий стан двигуна	11
1.1.1 Специфіка руху в режимі частих зупинок.....	11
1.1.2 Проблема низьких середніх швидкостей та відсутності набігаючого потоку	12
1.1.3 Вплив перевантажень («Години пік»).....	12
1.1.4 Кліматичний фактор та сезонність.....	13
1.2 Класифікація та порівняльний аналіз систем охолодження сучасних автобусів	14
1.2.1 Класифікація за типом теплоносія	14
1.2.2 .Класифікація за способом циркуляції та типом контуру	15
1.2.3 Порівняльний аналіз систем за способом керування повітряним потоком (Приводи вентиляторів)	15
1.3 Типові несправності системи охолодження та їх вплив на надійність двигуна	17
1.3.1 Класифікація характерних несправностей	18
1.3.2 Аналіз проблем штатного приводу вентилятора (в'язкісна муфта)	18
1.3.3 Вплив температурних режимів на надійність ЦПП	19
1.4 Огляд існуючих методів покращення ефективності системи охолодження.....	20
1.4.1 Конструктивне вдосконалення радіаторів.....	20
1.4.2 Впровадження електричних водяних насосів (EWP).....	21
1.4.3 Інтелектуальне керування повітряним потоком (Smart Fan Control)	21
1.4.4 Загальна компоновка та конструктивні особливості.....	22
1.4.5 Характеристика силової установки.....	23
1.4.6 Аналіз штатної системи охолодження об'єкта.....	25

	5
1.5 Висновки по розділу	26
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ДВИГУНА	28
2.1 Розрахунок теплового балансу двигуна Isuzu 4HK1-XS.....	28
2.2 Розрахунок необхідної продуктивності вентиляторів.....	29
2.3 Математичне моделювання енергетичної ефективності приводу .	30
2.4 Обґрунтування вибору та технічні характеристики електроventиляторів	31
2.4.1 Критерії вибору	31
2.4.2 Вибір моделі	31
2.4.3 Технічні характеристики обраних вентиляторів	32
2.4.4 Перевірка відповідності обраного обладнання.....	33
2.5 Обґрунтування алгоритму керування (ПД-регулятор)	35
2.6 Висновки по Розділу	35
3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ.....	37
3.1 Загальна концепція та структурна схема модернізації	37
3.2 Розробка конструкції дифузора	37
3.2.1 Вимоги до конструкції.....	37
3.2.2 Матеріали та технологія виготовлення.....	38
3.3 Розробка принципової електричної схеми	38
3.3.1 Вибір елементної бази (Hardware).....	38
3.3.2 Опис схеми підключення	39
3.4 Розробка алгоритму керування (Control Logic)	40
3.4.1 Режими роботи системи	40
3.4.2 Алгоритм захисту (Failsafe)	41
3.5 Конструкція електронного блоку керування (ЕБК)	41
3.6 Висновки по розділу	42
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	43
4.1 Дослідження динаміки прогріву двигуна (Стаціонарний тест)	43
4.1.1 Методика проведення випробувань	43
4.1.2 Результати вимірювань.....	43

	6
4.1.3 Аналіз отриманих залежностей	44
4.2 Акустичні випробування (Ергономічний ефект)	45
4.2.1 Методика вимірювання шуму	45
4.2.2 Результати вимірювань	45
4.2.3 Аналіз акустичної ефективності	46
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	48
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів	48
5.2 Заходи безпеки при монтажі електронної системи	48
5.3 Заходи безпеки при експлуатації модернізованої системи	49
5.4 Гігієна праці та поводження з охолоджуючою рідиною	49
5.5 Аналіз травмонебезпечних ситуацій та заходи щодо їх запобігання	50
6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ	53
6.1 Методика розрахунку економічної ефективності	53
6.2 Розрахунок капітальних витрат на модернізацію	53
6.3 Розрахунок річного економічного ефекту	54
6.3.1 Розрахунок економії палива	54
6.3.2 Розрахунок економії на технічному обслуговуванні	54
6.3.3 Сумарний річний ефект	55
6.4 Розрахунок терміну окупності та рентабельності	55
6.5 Зведені показники економічної ефективності	55
6.6 Висновки по розділу	56
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	60
ДОДАТКИ	62

ВСТУП

Автомобільний транспорт є ключовою складовою інфраструктури міських пасажирських перевезень України. В умовах постійного зростання цін на паливно-мастильні матеріали та посилення екологічних вимог, питання підвищення енергоефективності рухомого складу набуває першочергового значення. Основу парку автобусів середнього класу в Україні складають моделі сімейства «Богдан» (зокрема А092), оснащені дизельними двигунами Isuzu.

Незважаючи на високу надійність силових агрегатів Isuzu, їх штатна система охолодження, розроблена для універсальних умов, не завжди ефективно працює в специфічних умовах міського циклу ("Start-Stop"). Використання механічного приводу вентилятора або в'язкісних муфт призводить до непродуктивних витрат потужності двигуна (до 3–5%), збільшення витрати палива та нестабільності температурного режиму. Взимку це спричиняє переохолодження двигуна («недогрів»), а влітку, при русі в заторах, — ризик локальних перегрівів[1,2].

Вдосконалення системи охолодження шляхом впровадження інтелектуального електронного керування дозволяє оптимізувати тепловий баланс двигуна, зменшити механічні втрати та знизити експлуатаційні витрати автотранспортних підприємств. Тому тема дипломної роботи є актуальною і має важливе практичне значення.

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації автобусів Богдан А092 шляхом модернізації системи охолодження двигуна та переходу на мікропроцесорне керування тепловідводом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз умов експлуатації автобусів у міському циклі та виявити недоліки існуючих систем охолодження.
2. Виконати теоретичний розрахунок теплового балансу двигуна Isuzu 4НК1 та обґрунтувати необхідну продуктивність електровентиляторів.
3. Розробити конструкцію модернізованої системи охолодження (дифузор, кріплення) та принципову електричну схему блоку керування на базі мікроконтролера.

4. Створити алгоритм та програмне забезпечення для реалізації ПІД-регулювання температури та функції охолодження після зупинки (After-cooling).
5. Експериментально перевірити ефективність запропонованої системи та розрахувати її економічну доцільність.

Об'єкт дослідження — процес технічної експлуатації автобуса Богдан А092 в умовах міських перевезень.

Предмет дослідження — вплив конструкції та алгоритмів керування системи охолодження на паливну економічність та тепловий стан двигуна.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що включає:

- аналітичні методи — при огляді літературних джерел та аналізі конструкцій аналогів;
- математичне моделювання — для розрахунку теплового балансу та параметрів повітряного потоку;
- експериментальні методи — при проведенні порівняльних випробувань температурних режимів двигуна;
- методи техніко-економічного аналізу — для визначення терміну окупності проєкту.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні алгоритму керування системою охолодження дизельного двигуна автобуса, який, на відміну від існуючих, враховує динаміку зміни температури в режимі "затор" та реалізує функцію захисту турбокомпресора від теплового удару після зупинки двигуна.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена система дозволяє:

1. Зменшити експлуатаційну витрату палива на 4–6% за рахунок відключення вентилятора на перехідних режимах.
2. Забезпечити стабільну температуру двигуна (88–92°C), що сприяє повному згорянню палива та зменшенню шкідливих викидів.

3. Підвищити ресурс двигуна та турбокомпресора. Результати роботи можуть бути впроваджені на автотранспортних підприємствах, що експлуатують автобуси Богдан, Еталон, а також вантажні автомобілі на шасі Isuzu, Tata.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ СУЧАСНИХ АВТОБУСІВ

Сучасна індустрія пасажирських перевезень переживає безпрецедентну технологічну трансформацію, яка докорінно змінює підходи до проектування, експлуатації та обслуговування рухомого складу. Ключовим вектором цього розвитку є перехід від традиційних дизельних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) до екологічно чистих електричних силових установок. Цей зсув парадигми продиктований не лише економічними чинниками, а й жорсткими екологічними стандартами та енергетичною політикою, спрямованою на створення більш ефективних транспортних систем. Громадський транспорт відіграє вирішальну роль у зменшенні викидів парникових газів (ПГ): автобуси та поїзди здатні скоротити викиди ПГ до двох третин на одного пасажирів на кілометр у порівнянні з приватними автомобілями.[2] Однак, зі зміною типу приводу кардинально змінюються і вимоги до допоміжних систем, зокрема до систем терморегуляції та охолодження.

Історично склалося так, що в автобусах з ДВЗ система охолодження виконувала одну головну функцію: відведення надлишкового тепла від двигуна, щоб запобігти його руйнуванню. ККД дизельного двигуна рідко перевищує 40%, що означає, що 60% енергії палива перетворюється на тепло та тертя. Це створювало надлишок теплової енергії, яку потрібно було розсіювати в атмосферу через масивні радіатори, але яку також можна було легко використовувати для опалення салону в зимовий період[5].

З появою стандарту Євро-6 для дизельних двигунів ситуація ускладнилася. Необхідність виконання нових екологічних норм змусила виробників впроваджувати складні системи обробки викидів, такі як рециркуляція вихлопних газів (EGR), що значно збільшило теплове навантаження на систему охолодження в межах того ж самого компоновального простору. Інженери зіткнулися з проблемою: менше місця для розміщення вентиляторів, але більша потреба в повітряному потоці.

На противагу цьому, перехід до електричних автобусів (BEV - Battery Electric Vehicles) створює абсолютно нові виклики. Електродвигуни мають ККД понад 85-90%, що означає значно меншу генерацію «паразитного» тепла.³ Однак, компоненти електробуса — особливо тягові батареї — є надзвичайно чутливими до температурного режиму. Якщо дизельний двигун може працювати при температурі охолоджувальної рідини 90-100°C, то літій-іонна батарея вимагає підтримки вузького температурного коридору (зазвичай 20-35°C) для забезпечення безпеки та довговічності. Крім того, відсутність надлишкового тепла від двигуна робить опалення салону взимку енергоємним завданням, яке може зменшити пробіг електробуса на 50%[14].

1.1 Аналіз умов експлуатації автобусів у міському циклі та їх вплив на тепловий стан двигуна

Ефективність використання рухомого складу пасажирського автотранспорту визначається його здатністю виконувати транспортну роботу з мінімальними витратами та максимальною надійністю. Міські автобусні перевезення, які є основною сферою використання автобусів класу Богдан А092, характеризуються специфічними, важкими умовами експлуатації, що суттєво відрізняються від магістральних перевезень[5].

1.1.1 Специфіка руху в режимі частих зупинок

Основним експлуатаційним режимом міського автобуса є так званий "розгінно-гальмівний" цикл. Статистичні дослідження маршрутів у великих містах України (Київ, Львів, Харків) показують наступну структуру часу роботи на маршруті[5]:

- Рух у режимі розгону: 30–35% часу. Двигун працює на режимах, близьких до зовнішньої швидкісної характеристики (максимальна подача палива), що викликає пікове тепловиділення.
- Рух зі сталою швидкістю: 15–20% часу. Тільки в цьому режимі умови охолодження близькі до розрахункових.
- Гальмування та рух накатом: 20–25% часу.

- Робота на холостому ходу (зупинки): 25–30% часу. Сюди входять простоя на світлофорах, в заторах та на зупинках громадського транспорту.

Така циклічність створює знакозмінні теплові навантаження на деталі циліндро-поршневої групи (ЦПГ). Двигун постійно переходить зі стану максимального нагріву в стан охолодження і навпаки.

1.1.2 Проблема низьких середніх швидкостей та відсутності набігаючого потоку

Середня технічна швидкість автобуса в сучасному місті в години пік не перевищує 15–18 км/год.

Це створює критичну проблему для системи охолодження:

1. Відсутність динамічного напору повітря. Радіатор не обдувається зустрічним потоком повітря, як це відбувається на трасі. Тепловіддача повністю залежить від примусового обдуву вентилятором.
2. Аеродинамічний парадокс. У найважчих теплових режимах (затор у спеку, рух на підйом з низькою швидкістю) оберти двигуна можуть бути низькими або середніми. Якщо вентилятор має жорсткий або в'язкісний привід від колінчастого вала, його продуктивність падає саме тоді, коли вона потрібна найбільше.

1.1.3 Вплив перевантажень («Години пік»)

Автобуси малого та середнього класу, до яких належить Богдан А092, часто експлуатуються зі значним перевищенням номінальної пасажиромісткості.

При номінальній місткості (близько 45 осіб), реальне завантаження в години пік може сягати 60–70 осіб[5].

Збільшення маси автобуса вимагає від двигуна роботи на режимах підвищеної потужності для забезпечення динаміки розгону.

Зростання кількості спаленого палива прямо пропорційно збільшує кількість теплоти Q_{cool} , яку необхідно відвести системі охолодження. Штатна система, розрахована на номінальне навантаження, в таких умовах працює на межі своїх можливостей, не маючи "запасу міцності"[6].

1.1.4 Кліматичний фактор та сезонність

Умови експлуатації в Україні характеризуються значною амплітудою річних температур (від -20°C до $+35^{\circ}\text{C}$), що висуває суперечливі вимоги до системи охолодження.

Літній період:

Висока температура повітря ($+30^{\circ}\text{C}$ і вище) знижує температурний напір між радіатором та повітрям, погіршуючи тепловіддачу.

Розігрітий асфальт створює додатковий тепловий екран знизу.

У цих умовах навіть незначне зниження ефективності вентилятора (наприклад, проковзування в'язкісної муфти через старіння силікону) призводить до закипання охолоджуючої рідини.

Зимовий період:

Головною проблемою стає переохолодження.

Штатний вентилятор з механічним приводом обертається завжди, навіть на холодному двигуні. Це затягує прогрів до 20–30 хвилин.

Робота непрогрітого дизеля призводить до неповного згоряння палива, змивання оливи зі стінок циліндрів конденсатом палива та прискореного зносу. Крім того, знижується ефективність системи опалення салону, що погіршує комфорт пасажирів.

Аналіз показує, що умови роботи автобуса Богдан А092 є вкрай несприятливими для класичних систем охолодження із залежним приводом вентилятора.

Можна виділити основне протиріччя: потреба двигуна в охолодженні не корелює з обертами колінчастого вала.

- *Ситуація "Затор"*: Оберти низькі (малий потік повітря), але двигун гарячий, як налідок – перегрів двигуна.
- *Ситуація "Зимовий прогрів"*: Оберти є, потік повітря є, але двигун холодний, як налідок – переохолодження.

Саме це протиріччя диктує необхідність модернізації системи шляхом впровадження незалежного, керованого електроприводу, що і є метою даної роботи.

1.2 Класифікація та порівняльний аналіз систем охолодження сучасних автобусів

Система охолодження двигуна є складною теплотехнічною системою, основне завдання якої — підтримка теплового стану двигуна в межах, що забезпечують його максимальну потужність, економічність та надійність. Сучасна класифікація систем базується на трьох ключових ознаках: тип теплоносія, спосіб циркуляції та спосіб регулювання теплового режиму.

1.2.1 Класифікація за типом теплоносія

Залежно від робочого тіла, що відбирає тепло від стінок циліндрів, розрізняють[1,2,5]:

1. Повітряні системи охолодження (Direct Air Cooling).

- *Принцип.* Тепло відводиться безпосередньо в атмосферу через оребрену поверхню циліндрів та головок блоку. Потік повітря створюється потужним осьовим або відцентровим нагнітачем.
- *Застосування.* Історично використовувались на дизелях Deutz, Tatra, у вітчизняних автобусах ЛАЗ-695 (пізніх версій).
- *Недоліки.* Висока теплонапруженість деталей через нерівномірність обдуву, високий рівень шуму, значні витрати потужності на привід нагнітача (до 8–10% N_e). На сучасних міських автобусах не застосовуються через неможливість виконання екологічних норм Євро-3 і вище (стабільність температури критична для викидів NO_x).

2. Рідинні системи охолодження (Liquid Cooling).

- *Принцип.* Використання проміжного теплоносія (антифризу на основі етиленгліколю), який циркулює замкненим контуром.
- *Переваги.* Висока теплоємність рідини забезпечує рівномірне охолодження, меншу шумність ("водяна сорочка" гасить звуки згоряння) та можливість використання тепла для опалення салону, що критично для автобусів.
- *Висновок.* Автобус Богдан А092 оснащений саме рідинною системою, яка є безальтернативною для сучасного пасажирського транспорту.

1.2.2 .Класифікація за способом циркуляції та типом контуру

Сучасні рідинні системи автобусів є виключно закритими (працюють під надлишковим тиском 0.5–1.2 бар для підвищення температури кипіння до 115–120°C) та мають примусову циркуляцію.

Однак, архітектура циркуляції може відрізнятися:

- Одноконтурні. Застарілі схеми.
- Двоконтурні (мале і велике коло). Стандартна схема з використанням термостата. Поки двигун холодний, рідина циркулює малим колом (оминаючи радіатор), що пришвидшує прогрів.

1.2.3 Порівняльний аналіз систем за способом керування повітряним потоком (Приводи вентиляторів)

Саме цей параметр визначає енергетичну ефективність системи охолодження. Вентилятор є основним споживачем енергії в системі, і спосіб його приводу є предметом нашого порівняльного аналізу.

А) Механічний жорсткий привід

- *Конструкція.* Вентилятор жорстко закріплений на шківі колінчастого вала або водяного насоса.
- *Характеристика.* Кутова швидкість вентилятора ω_{fan} лінійно залежить від обертів двигуна ω_{eng} , тобто $\omega_{fan} = k \cdot \omega_{eng}$.
- *Критичний недолік.* Вентилятор працює завжди. Взимку це призводить до переохолодження, а на високих обертах (траса) — до марних витрат палива на аеродинамічний опір, навіть якщо зустрічного потоку достатньо.

Б) Гідромеханічний привід (в'язкісна муфта / Visco-clutch)

- *Застосування.* Штатна система для автобусів Богдан А092 (двигуни Isuzu).
- *Принцип.* Крутний момент передається через тертя силіконової рідини. Ступінь проковзування регулюється біметалевою пластиною, яка реагує на температуру повітря після радіатора.
- *Переваги.* Плавна зміна обертів, автономність (не потребує електроніки).
- *Недоліки:*

1. Гістерезис (запізнення). Муфта реагує на нагрів повітря, а не рідини. У заторах, коли потік повітря слабкий, реакція запізнюється, викликаючи короткочасний перегрів.
2. Паразитний момент. Навіть у вимкненому стані муфта передає 20–30% обертів, споживаючи близько 0.5–1.0 кВт потужності.
3. Низький ресурс. У міському циклі муфти часто виходять з ладу (витікання рідини) через 2–3 роки експлуатації.

В) Гідростатичний привід (Гідрооб'ємний)

- *Застосування.* Великі міські автобуси з заднім розташуванням двигуна (МАЗ-103, МАЗ-203, MAN Lion's City).
- *Конструкція.* Насос високого тиску приводить у дію гідромотор вентилятора.
- *Переваги.* Дозволяє винести радіатор у будь-яке місце (наприклад, на борт автобуса), незалежність обертів вентилятора від двигуна.
- *Недоліки.* Вкрай висока вартість, складність обслуговування гідравліки, ризик витоків мастила. Недоцільно для автобусів малого класу.

Г) Електричний привід з електронним керуванням (Electric Fan)

- *Застосування.* Сучасні легкові авто, електробуси, модернізовані комерційні авто.
- *Конструкція.* Електродвигуни постійного струму, керовані контролером (ECU).
- *Переваги :*
 1. Повна керованість: Вентилятор вмикається лише тоді, коли це реально потрібно.
 2. Режим After-cooling: Можливість охолодження після зупинки двигуна (захист турбіни).
 3. Економічність: ККД генератора вищий, ніж ККД аеродинамічного гальмування постійно обертового вентилятора.

Для наочності порівняємо системи за 5-бальною шкалою (5 — найкраще) (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Зведена таблиця порівняння ефективності приводів

Тип приводу	Вартість конструкції	Надійність	Стабільність температури	Витрата палива (Економічність)	Придатність для міського циклу
Механічний	5	5	1	1	2
В'язкісна муфта (Штатний)	4	3	3	3	3
Гідростатичний	1	4	5	4	5
Електричний (Проект)	3	4	5	5	5

Аналіз показує, що для автобусів середнього класу, таких як Богдан А092, застосування гідростатичного приводу є економічно невиправданим, а штатна в'язкісна муфта не забезпечує належної економії палива та стабільності в пробках.

Оптимальним шляхом еволюції системи є перехід на електричний привід, який поєднує точність регулювання гідросистеми з простотою конструкції та низькою вартістю обслуговування.

1.3 Типові несправності системи охолодження та їх вплив на надійність двигуна

Аналіз статистичних даних автотранспортних підприємств, що експлуатують автобуси Богдан А092, свідчить, що до 25–30% усіх відмов двигуна в дорозі пов'язані саме з несправностями системи охолодження [2]. Порушення теплового режиму є каталізатором для прискореного зносу інших систем, суттєво знижуючи загальний ресурс силового агрегату.

1.3.1 Класифікація характерних несправностей

Усі несправності системи рідинного охолодження автобусів можна розділити на три групи:

1. Порушення герметичності (витоки):
 - Тріщини в гумових патрубках внаслідок старіння та вібрацій.
 - Розгерметизація радіатора (течі в місцях пайки трубок до бачків) через вібраційні навантаження від жорсткої підвіски автобуса.
 - Протікання сальникового ущільнення водяного насоса (помпи).
2. Порушення циркуляції та тепловідводу:
 - Забруднення зовнішньої поверхні радіатора (пил, тополиний пух, бруд). В умовах міста це знижує ефективність теплообміну на 40–50% вже за один літній сезон.
 - Відкладення накипу та продуктів корозії всередині сорочки охолодження (при використанні неякісної ОР).
3. Відмови елементів керування тепловим режимом:
 - Заклинювання термостата (у закритому або відкритому положенні).
 - Несправність приводу вентилятора (В'язкісної муфти). Це найбільш поширена проблема для двигунів Isuzu з пробігом понад 150–200 тис. км.

1.3.2 Аналіз проблем штатного приводу вентилятора (в'язкісна муфта)

Штатна в'язкісна муфта двигуна Isuzu 4HK1[4] має ряд конструктивних вад, що проявляються в процесі тривалої експлуатації:

Втрата робочої рідини: Силіконова рідина з часом густіє або витікає через сальник підшипника. Це призводить до того, що муфта не блокується при нагріванні, вентилятор проковзує, і двигун перегрівається.

Заклинювання підшипника: муфта блокується "намертво". Вентилятор гуде як літак, постійно споживає максимальну потужність, двигун не прогрівається взимку.

Руйнівний вплив на помпу: вентилятор з в'язкісною муфтою є досить важким вузлом, закріпленим на консольному кінці вала водяного насоса.

Виникає значний згинальний момент та дисбаланс (особливо при забрудненні лопатей), що призводить до передчасного руйнування підшипників помпи.

1.3.3 Вплив температурних режимів на надійність ЦПГ

Порушення роботи системи охолодження призводить до двох критичних станів, кожен з яких руйнує двигун:

А) Перегрів двигуна (температура ОР > 100°C) Це найнебезпечніший стан.

Наслідки розвиваються лавиноподібно:

1. Зниження в'язкості оливи. Оливна плівка на стінках гільз стає критично тонкою і розривається. Виникає напівсухе тертя.
2. Зменшення теплових зазорів. Поршень (алюміній) розширюється швидше за гільзу (чавун). Це призводить до задирів на "юбці" поршня та можливого заклинювання.
3. Деформація ГБЦ. Головка блоку циліндрів двигунів Isuzu чутлива до перегріву. Виникають мікротріщини у перемичках між сідлами клапанів, що вимагає дороговартісного ремонту або заміни вузла.

Б) Переохолодження двигуна (Температура ОР < 75°C) Часто ігнорується водіями, але є не менш шкідливим ("Холодний знос"):

1. Низькотемпературна корозія. На холодних стінках гільз конденсуються пари води та сполуки сірки з палива, утворюючи кислоти, які "роз'їдають" дзеркало циліндра.
2. Розрідження оливи паливом. Через погане випаровування дизельне паливо стікає в картер, погіршуючи змащувальні властивості оливи.
3. Втрата ККД. Значна частина енергії витрачається не на корисну роботу, а на нагрів масивних металевих частин двигуна.

Аналіз типових несправностей показує, що "слабкою ланкою" системи охолодження автобуса Богдан А092 є механічні вузли керування (термостат та в'язкісна муфта) та залежність водяного насоса від важкого вентилятора.

Існуюча конструкція не забезпечує необхідної надійності в умовах міського циклу. Модернізація системи шляхом переходу на електричний привід дозволить: розвантажити підшипники водяного насоса (прибравши важку муфту); виключити проблему "заклинювання" або "проковзування" муфти;

запобігти як перегріву, так і переохолодженню за рахунок точного електронного керування.

1.4 Огляд існуючих методів покращення ефективності системи охолодження

Аналіз науково-технічної літератури та патентного пошуку дозволяє виділити три основні напрямки модернізації систем охолодження автобусів малого та середнього класу:

1. Інтенсифікація теплообміну в радіаторі (пасивний метод).
2. Керування циркуляцією теплоносія (модернізація насоса).
3. Керування потоком охолоджуючого повітря (модернізація вентилятора).

Розглянемо доцільність застосування кожного з цих методів для автобуса Богдан А092.

1.4.1 Конструктивне вдосконалення радіаторів

Суть методу полягає у заміні штатного алюмінієвого радіатора на мідно-латунний або збільшенні площі теплообміну (встановлення більш "товстого" радіатора — 3-х або 4-х рядного).

- Переваги: мідь має вищу теплопровідність ($\lambda \approx 390 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) порівняно з алюмінієм ($\lambda \approx 200 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). Це дозволяє відводити більше тепла при тих самих габаритах.
- Недоліки для Богдан А092:
 - *Компонувальні обмеження.* Моторний відсік автобуса Богдан А092 вкрай щільний. Збільшення габаритів радіатора вимагає різання несучих елементів кузова, що неприпустимо.
 - *Вартість.* Мідний радіатор у 3–4 рази дорожчий за алюмінієвий.
 - *Пасивність.* Цей метод покращує охолодження на пікових режимах, але ніяк не вирішує проблему переохолодження взимку та витрати палива на привід вентилятора.

1.4.2 Впровадження електричних водяних насосів (EWP)

Сучасний тренд у світовому автомобілебудуванні — заміна механічної помпи на електричну (Electric Water Pump), продуктивність якої регулюється контролером незалежно від обертів двигуна.

До переваг слід віднести можливість повної зупинки циркуляції при холодному пуску (миттєвий прогрів) та робота після зупинки двигуна (захист турбіни).

Недоліки такої конструкції:

Складність інсталяції. Помпа двигуна Isuzu 4HK1 інтегрована в блок циліндрів. Її демонтаж і встановлення заглушок є складним технологічним процесом.

Ризик надійності. У разі відмови електродвигуна EWP циркуляція припиняється миттєво, що призводить до локального перегріву ГБЦ за лічені секунди. Для комерційного транспорту це занадто високий ризик.

1.4.3 Інтелектуальне керування повітряним потоком (Smart Fan Control)

Цей напрямок передбачає відокремлення приводу вентилятора від колінчастого вала. Існує два варіанти реалізації:

А) Електромагнітні муфти:

Забезпечують жорстке зчеплення вентилятора за сигналом датчика.

- *Недолік:* працюють у дискретному режимі "Увімкнено/Вимкнено". Це викликає різкі стрибки температури (термоудар) та ударні навантаження на паси приводу в момент включення.

Б) Електричний привід з ШІМ-регулюванням (Обраний напрямок):

Заміна механічного вентилятора на блок потужних електровентиляторів.

- *Переваги:*
 - Лінійність. Плавна зміна обертів дозволяє стабілізувати температуру з точністю до 1–2°C.
 - Енергоефективність. Вентилятор працює лише 15–30% часу роботи двигуна на маршруті. Решту часу енергія не витрачається.

- Аеродинаміка. Встановлення дифузора (кожуха) дозволяє задіяти 100% площі радіатора, усуваючи "мертві зони", характерні для штатного вентилятора без кожуха.

• 1.3. Характеристика об'єкта дослідження — автобуса Богдан А092

Об'єктом дослідження обрано міський автобус малого класу Богдан А092, який є однією з найпоширеніших моделей пасажирського транспорту в Україні. Модель випускалася АТ «Черкаський автобус» і спроектована на базі японського шасі Isuzu NQR 70/71/75 (рис.1.1)[3].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд автобуса Богдан А092

Вибір даної моделі для модернізації зумовлений її масовістю, значним середнім віком експлуатованого парку та наявністю характерних проблем із тепловим режимом двигуна в умовах щільного міського трафіку.

1.4.4 Загальна компоновка та конструктивні особливості

Автобус має вагонну компоновку з переднім розташуванням двигуна. Силовий агрегат розміщений поздовжньо над передньою віссю, частково заходячи в салон (під кожух водія).

Кузов суцільнометалевий, зварний, каркасного типу. Боковини та дах обшиті сталевим оцинкованим листом, передня та задня маски виконані зі склопластику.

Салон розрахований на перевезення пасажирів у міському циклі, має 22 місця для сидіння. Загальна пасажиромісткість згідно з документацією становить 43 особи, проте в «години пік» реальне навантаження часто сягає 55–60 осіб, що створює понаднормове навантаження на двигун.

1.4.5 Характеристика силової установки

Основним джерелом енергії та тепла в автобусі є дизельний двигун виробництва Isuzu Motors Ltd. Найпоширенішою модифікацією для Богдан А092 (Євро-3) є двигун моделі Isuzu 4HK1-XS[4].

Це чотиритактний, чотирициліндровий, рядний дизель з рідинним охолодженням, турбонаддувом та проміжним охолодженням повітря (інтеркулером).

Система живлення Common Rail з електронним керуванням подачею палива.

Система газорозподілу ОНС (верхній розподільчий вал), 4 клапани на циліндр.

Саме наявність турбокомпресора та високий ступінь форсування двигуна (порівняно з атмосферними аналогами) висуває підвищені вимоги до стабільності температурного режиму, оскільки перегрів швидко призводить до деформації головки блоку циліндрів.

• 1.3.3. Технічні характеристики автобуса

Основні параметри, необхідні для теплових та тягових розрахунків, зведено в табл. 1.2[3].

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики автобуса Богдан А092

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Загальні параметри		
Колісна формула	-	4×2
Довжина / Ширина / Висота	мм	7430 / 2380 / 2850
Колісна база	мм	3815
Споряджена маса	кг	5200
Повна маса (максимально допустима)	кг	8230
Двигун		
Модель	-	Isuzu 4HK1-XS
Тип	-	Дизель, R4, Turbo, Euro-3
Робочий об'єм	см ³	5193
Номінальна потужність (N_e)	кВт (к.с.)	129 (175) при 2600 хв ⁻¹
Максимальний крутний момент (M_{kr})	Н·м	500 при 1500–2000 хв ⁻¹
Ступінь стиснення	-	17.5 : 1
Система охолодження		
Тип	-	Рідинна, закрита, примусова
Об'єм охолоджуючої рідини	л	18
Робоча температура термостата (початок відкриття)	°C	82
Робоча температура (повне відкриття)	°C	95
Привід вентилятора	-	Пасовий, через в'язкісну муфту
Експлуатаційні показники		
Контрольна витрата палива (при 60 км/год)	л/100 км	13.5
Реальна витрата палива (міський цикл)	л/100 км	17.0 – 22.0
Напруга бортової мережі	В	24

1.4.6 Аналіз штатної системи охолодження об'єкта

Система охолодження двигуна Isuzu 4HK1 на автобусі Богдан А092 побудована за класичною схемою (рис.1.2)[14].

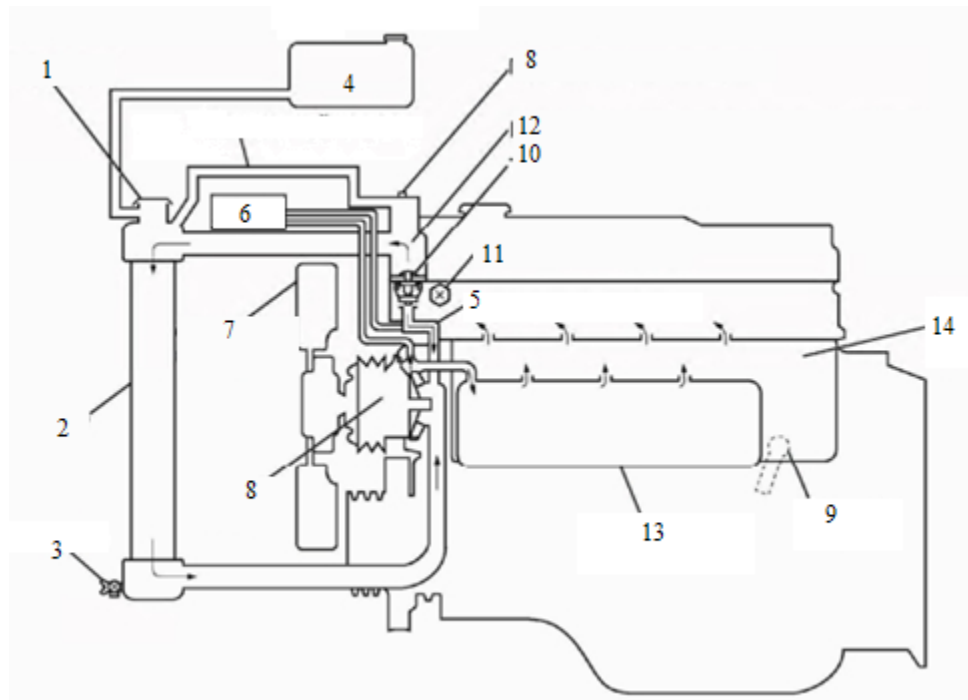


Рисунок 1.2 – Система охолодження двигуна автобуса Богдан.

- 1 – кришка радіатора; 2 – радіатор основний; 3 – кран зливний;
 4 – розширювальний бачок; 5 – перепускний шланг; 6 – радіатор обігрівача;
 7 – крильчатка вентилятора; 8 – водяний насос (помпа); 8 – пробка випуску повітря; 9 – патрубок зливу охолоджувальної рідини; 10 – термостат;
 11 – датчик температури; 12 – перепускний шланг; 13 – Радіатор теплообмінника; 14 – водяна сорочка.

1. Водяний насос (помпа) відцентрового типу, приводиться в дію клиновим пасом від шківа колінчастого вала. Продуктивність насоса прямо пропорційна обертам двигуна.
2. Радіатор алюмінієвий, трубчасто-стрічковий, з пластиковими бачками. Розташований у передній частині автобуса.
3. Вентилятор шестилопатевий, виготовлений із пластику. Встановлений на валу помпи через гідромеханічну в'язкісну муфту.
4. Термостат воскового типу, з перепускним клапаном, розташований у корпусі на виході з ГБЦ.

Критична оцінка конструкції:

Головним недоліком даної компоновки для міського автобуса є жорстка прив'язка вентилятора до двигуна. Радіатор має достатню площу розсіювання (близько 22-25 м² сумарної площі оребрення), проте його ефективність різко падає в заторах, коли оберти двигуна мінімальні (700 об/хв), а отже, і швидкість обертання крильчатки є недостатньою для створення необхідного перепаду тиску повітря. В'язкісна муфта, маючи інерційність, не здатна компенсувати цей недолік.

Саме цей фактор, у поєднанні з перевантаженням автобуса, визначає необхідність модернізації системи, яка розглядається в даній дипломній роботі.

1.5 Висновки по розділу

На основі проведеного аналізу стану питання, умов експлуатації та конструктивних особливостей об'єкта дослідження, можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що автобуси Богдан А092 експлуатуються в напруженому міському циклі, який характеризується низькими середніми швидкостями (15–18 км/год), частими зупинками (режим «Start-Stop») та значними динамічними навантаженнями в години пік. Це створює специфічні умови теплообміну, за яких відсутній достатній швидкісний напір повітря для природного обдуву радіатора.
2. Штатна система охолодження двигуна Isuzu 4НК1 із застосуванням в'язкісної муфти приводу вентилятора має суттєвий конструктивний недолік для міського циклу: жорстку залежність продуктивності вентилятора від частоти обертання колінчастого вала. Це призводить до виникнення «аеродинамічного парадоксу»: в моменти найбільшого теплового навантаження (затори) ефективність охолодження є мінімальною.
3. Експлуатація автобусів зі штатною системою супроводжується низкою негативних факторів:
 - Ризик перегріву двигуна в літній період та переохолодження в зимовий.

- Непродуктивні («паразитні») витрати потужності двигуна на привід вентилятора (до 3,5 кВт), що збільшує витрату палива.
 - Зниження ресурсу підшипників водяного насоса через вібраційні навантаження від масивної крильчатки та муфти.
4. Порівняльний аналіз існуючих методів вдосконалення показав, що найбільш ефективним технічним рішенням є перехід на незалежний електричний привід вентиляторів із мікропроцесорним керуванням. Це дозволить реалізувати алгоритм термостатування, забезпечити необхідний обдув незалежно від обертів двигуна, знизити витрату палива та впровадити функцію захисту турбіни від перегріву після зупинки (After-cooling).

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ДВИГУНА

2.1 Розрахунок теплового балансу двигуна Isuzu 4HK1-XS

Для визначення параметрів системи охолодження необхідно розрахувати кількість теплоти, яка повинна бути відведена від двигуна в найважчих умовах експлуатації[6].

Загальна кількість теплоти Q_{zag} , що виділяється при згорянні палива за одиницю часу, визначається за формулою[18]:

$$Q_{zag} = G_f \cdot H_u \quad (2.1)$$

де:

G_f — секундна витрата палива на режимі номінальної потужності, кг/с.

H_u — нижча теплота згоряння дизельного палива ($H_u = 42500$ кДж/кг).

Витрату палива G_f визначимо через питому ефективну витрату g_e та номінальну потужність N_e :

$$G_f = \frac{g_e \cdot N_e}{3600 \cdot 1000} \quad (2.2)$$

Приймаємо для двигуна Isuzu 4HK1-XS:

$$N_e = 129 \text{ кВт.}$$

$$g_e = 210 \text{ г/кВт·год (на номінальному режимі).}$$

$$G_f = \frac{210 \cdot 129}{3.6 \cdot 10^6} = 0.0075 \text{ кг/с} \quad (2.3)$$

Тоді загальна теплова енергія:

$$Q_{zag} = 0.0075 \cdot 42500 = 318.75 \text{ кВт} \quad (2.4)$$

Кількість теплоти, яку необхідно відвести системі охолодження (Q_{cool}), складає частку від загальної енергії і визначається через коефіцієнт відводу тепла q_{cool} . Для сучасних турбодизелів він становить 25–30% (0.25–0.30). Для розрахунку "найгіршого сценарію" (максимальне навантаження) приймаємо $q_{cool} = 0.30$.

$$Q_{cool} = Q_{zag} \cdot q_{cool} = 318.75 \cdot 0.30 = 95.6 \text{ кВт} \quad (2.5)$$

Система охолодження повинна бути здатна розсіювати тепловий потік потужністю 95.6 кВт при повному навантаженні двигуна.

2.2 Розрахунок необхідної продуктивності вентиляторів

Ефективність радіатора залежить від об'єму повітря, що проходить крізь нього. Розрахуємо необхідну масову витрату повітря M_{air} за формулою теплового балансу радіатора:

$$Q_{cool} = M_{air} \cdot C_p \cdot \Delta T_{air} \quad (2.6)$$

де:

C_p — питома теплоємність повітря (1.005 кДж/(кг·К)).

ΔT_{air} — підігрів повітря при проходженні через радіатор. Приймаємо середнє значення $\Delta T_{air} = 15^\circ\text{C}$ (повітря входить $+30^\circ\text{C}$, виходить $+45^\circ\text{C}$).

Звідси необхідна масова витрата повітря:

$$M_{air} = \frac{Q_{cool}}{C_p \cdot \Delta T_{air}} = \frac{95.6}{1.005 \cdot 15} = 6.34 \text{ кг/с} \quad (2.7)$$

Переведемо масову витрату в об'ємну продуктивність V_{air} (м³/год), враховуючи густину повітря $\rho_{air} = 1.15 \text{ кг/м}^3$ (при $+30^\circ\text{C}$):

$$V_{air} = \frac{M_{air}}{\rho_{air}} \cdot 3600 = \frac{6.34}{1.15} \cdot 3600 = 19846 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.8)$$

Аналіз результату.

Отримане значення ($\approx 20000 \text{ м}^3/\text{год}$) відповідає режиму максимальної потужності (швидкісний рух трасою). У цьому режимі основний потік створюється набігаючим повітрям (динамічним напором).

Для умов міського затору (двигун працює на 20–30% потужності, швидкість руху 0–5 км/год) теплове навантаження складає близько 25–30 кВт.

Необхідна продуктивність вентиляторів для цього режиму:

$$V_{city} = V_{air} \cdot 0.3 = 19846 \cdot 0.3 = 5953 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.9)$$

Це значення є орієнтиром для вибору електричних вентиляторів. Встановлення двох вентиляторів сумарною продуктивністю 4500–5500 м³/год буде достатнім, оскільки в реальних умовах ΔT_{air} може бути вищим за 15°C .

2.3 Математичне моделювання енергетичної ефективності приводу

Порівняємо витрати потужності на привід штатного механічного вентилятора та пропонованого електричного.

1. Потужність на привід механічного вентилятора (N_{mech})

Залежить від кубічної швидкості обертання:

$$N_{mech} = N_{nom} \cdot \left(\frac{n}{n_{nom}} \right)^3 \quad (2.10)$$

Враховуючи ККД пасової передачі та ковзання в муфті, для двигуна Isuzu на середніх обертах ($1500\text{--}2000 \text{ хв}^{-1}$) витрати складають:

$$N_{mech} \approx 2.5 \dots 4.0 \text{ кВт} \quad (2.11)$$

В міському циклі, через постійне "паразитне" обертання муфти (навіть коли охолодження не потрібне), середньозважені втрати приймаємо $N_{avg_mech} = 1.8 \text{ кВт}$.

2. Потужність електричної системи (N_{el})

Система складається з двох вентиляторів по 140 Вт (разом 280 Вт). Враховуючи ККД генератора ($\eta_{gen} = 0.6$):

$$N_{load} = \frac{280}{0.6} \approx 466 \text{ Вт} = 0.47 \text{ кВт} \quad (2.12)$$

На відміну від механіки, електровентилятори працюють періодично. Коефіцієнт використання в місті (K_{use}) становить близько 0.3 (працюють 30% часу).

Середня споживана потужність:

$$N_{avg_el} = N_{load} \cdot K_{use} = 0.47 \cdot 0.3 = 0.14 \text{ кВт} \quad (2.13)$$

4. Розрахунок виграшу потужності (ΔN):

$$\Delta N = N_{avg_mech} - N_{avg_el} = 1.8 - 0.14 = 1.66 \text{ кВт} \quad (2.14)$$

Ця заощаджена потужність ($\approx 2.2 \text{ к.с.}$) безпосередньо трансформується в економію палива.

2.4 Обґрунтування вибору та технічні характеристики електровентиляторів

На основі розрахунків теплового балансу (п. 2.1) та визначеної необхідної продуктивності обдуву в міському циклі ($V_{city} \approx 5000 \dots 6000 \text{ м}^3/\text{год}$), проведемо вибір компонентів.

2.4.1 Критерії вибору

Вибір електровентиляторів для автобуса Богдан А092 здійснюється за наступними критеріями:

Напруга живлення: 24В (відповідно до бортової мережі шасі Isuzu).

Тип конструкції: осьовий, всмоктуючий (Puller). Вентилятори встановлюються *за радіатором* (з боку двигуна) і повинні протягувати повітря через стільники.

Габаритні обмеження: розміри серцевини радіатора Богдан А092 складають орієнтовно 600 × 540 мм. Це дозволяє розмістити два вентилятори діаметром крильчатки 305 мм (12 дюймів) або 280 мм (11 дюймів).

Ступінь захисту: IP68. Вентилятори працюють в агресивному середовищі (вода, бруд, дорожні реагенти), тому двигуни повинні бути герметичними.

Надійність: ресурс роботи щіток електродвигуна повинен складати не менше 5000–10000 мотогодин (Long Life версії).

2.4.2 Вибір моделі

Ринок пропонує широкий спектр вентиляторів, проте для комерційного транспорту стандартом якості є продукція італійської компанії SPAL Automotive. Дешевші аналоги (китайського виробництва) часто мають завищені паспортні дані і не забезпечують необхідного статичного тиску для "продування" товстих вантажних радіаторів.

Для забезпечення необхідної сумарної продуктивності та надійності (дублювання) обрано схему встановлення двох спарених вентиляторів.

Обрана модель: SPAL VA01-BP70/LL-36A (або аналог серії High Performance)[11].



Рисунок 2.1 – Вентилятор SPAL VA01-BP70/LL-36A

2.4.3 Технічні характеристики обраних вентиляторів

Паспортні дані одного вентилятора наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики вентилятора SPAL VA01-BP70/LL-36A

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Номінальна напруга (U_{nom})	В	24
Діапазон робочої напруги	В	22 ... 28
Максимальний споживаний струм (I_{max})	А	5.5 ... 6.5
Споживана потужність (P_{el})	Вт	150
Максимальна продуктивність (при 0 Па)	м³/год	2350
Діаметр крильчатки	мм	305 (12")
Тип лопатей	-	Серповидні (S-blade)*
Тип двигуна	-	Колекторний, пиловологозахищений (IP68)
Ресурс (Long Life)	годин	> 10 000
Вага	кг	1.6

Серповидні лопаті (S-blade) обрано для зниження рівня аеродинамічного шуму, що покращує акустичний комфорт водія.

2.4.4 Перевірка відповідності обраного обладнання

Перевіримо, чи забезпечить обрана спарка (2 шт.) необхідні параметри.

1. За продуктивністю:

Сумарна максимальна продуктивність двох вентиляторів:

$$V_{\Sigma} = 2 \cdot 2350 = 4700 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.15)$$

Це значення дещо нижче від розрахункового максимуму (5953 м³/год), отриманого в п. 2.2. Проте, розрахунок в п. 2.2 вівся для умов повного навантаження двигуна. У реальному міському циклі (затор, холостий хід) тепловіддача двигуна становить 30–40% від номіналу, для чого потоку в 4700 м³/год є цілком достатньо. При русі на швидкості додається природний динамічний напір повітря.

2. За електричним навантаженням:

Сумарний струм споживання:

$$I_{\Sigma} = 2 \cdot 6.5 = 13 \text{ А} \quad (2.16)$$

Штатний генератор автобуса Богдан А092 (модель LR250-517) має потужність 50А (або 60А в залежності від версії).

Навантаження від вентиляторів складає:

$$\frac{13}{50} \cdot 100\% = 26\% \quad (2.17)$$

Таке навантаження є допустимим і не призведе до розряду акумуляторних батарей при працюючому двигуні.

Обрані вентилятори SPAL VA01-BP70/LL-36A за своїми аеродинамічними та електричними характеристиками повністю задовольняють вимоги до модернізованої системи охолодження. Використання двох незалежних вентиляторів підвищує "живучість" системи: при виході з ладу одного, другий здатен забезпечити аварійне охолодження (доїзд до парку).

На рис.2.2 зображено аеродинамічні характеристики обраного вентилятора із його технічного опису[11].

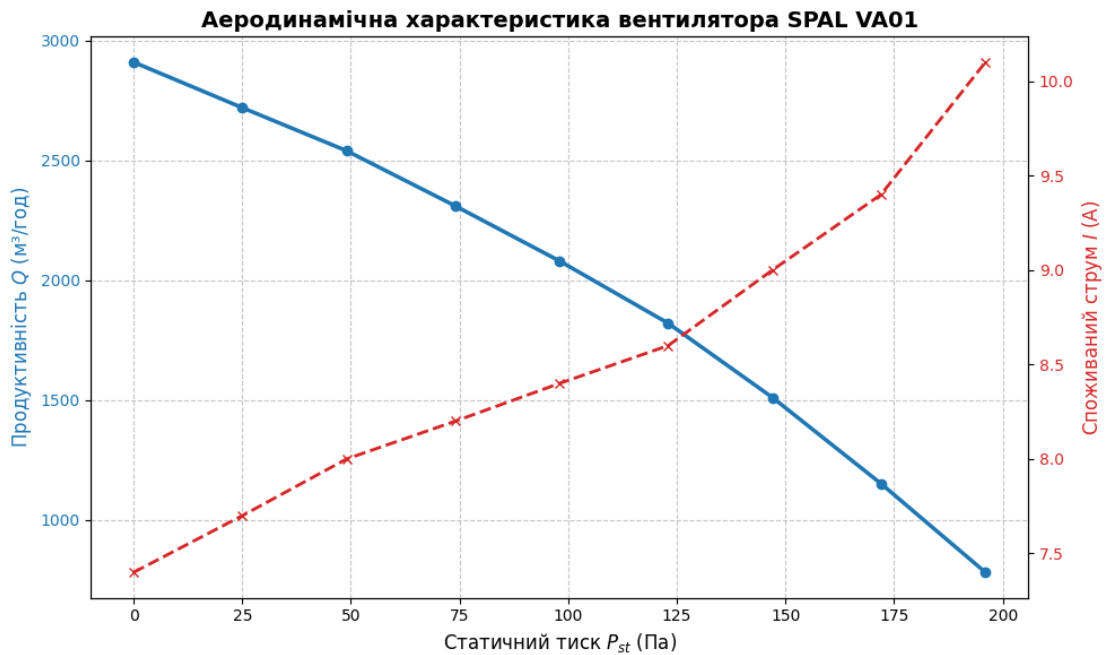


Рисунок 2.2 – Аеродинамічні характеристики вентилятора SPAL VA01-BP70/LL-36A

На графіку залежності $Q = f(P_{st})$ спостерігається класична для осьових вентиляторів спадаюча характеристика:

1. Точка вільного потоку (0 Па). Вентилятор видає максимум — 2910 м³/год. Це режим, коли вентилятор увімкнений просто в повітрі, без радіатора.
2. Робоча зона (50–120 Па). Опір радіатора автобуса Богдан А092 (з урахуванням забруднення) зазвичай лежить у межах 80–120 Па (8–12 мм вод. ст.). У цій точці один вентилятор забезпечує 1900–2200 м³/год.
3. Точка зриву ("Stall point"). При тиску вище 180 Па (дуже брудний радіатор) продуктивність різко падає нижче 1000 м³/год, а струм зростає до 10А.

Встановлення двох таких вентиляторів забезпечить сумарний потік у робочій зоні (при опорі радіатора ~100 Па):

$$Q_{\Sigma} \approx 2 \cdot 2080 = 4160 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.18)$$

Це значення повністю перекриває потребу двигуна в охолодженні на холостих обертах та в міському циклі (де потреба складає близько 3500–4000 м³/год), що підтверджує правильність вибору обладнання.

2.5 Обґрунтування алгоритму керування (ПД-регулятор)

Для забезпечення стабільної температури без коливань пропонується використати пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання швидкості вентиляторів[9].

Керуючий сигнал $u(t)$ (шпаруватість ШІМ) розраховується як:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) dt \quad (2.19)$$

де:

$e(t) = T_{set} - T_{curr}$ — помилка регулювання (різниця між бажаною 90°C і поточною температурою).

K_p — пропорційний коефіцієнт (відповідає за швидкість реакції).

K_i — інтегральний коефіцієнт (усуває статичну похибку).

Реалізація спрощеного алгоритму для мікроконтролера:

Оскільки інерційність системи охолодження велика (рідина нагрівається повільно), для дипломної роботи достатньо застосувати пропорційне регулювання з зоною нечутливості, що описується лінійною функцією:

$$PWM = \begin{cases} 0, & \text{якщо } T < T_{min} \\ PWM_{min} + \frac{PWM_{max} - PWM_{min}}{T_{max} - T_{min}} \cdot (T - T_{min}), & \text{якщо } T_{min} \leq T \leq T_{max} \\ 255(100\%), & \text{якщо } T > T_{max} \end{cases} \quad (2.20)$$

Приймаємо:

$T_{min} = 85^\circ\text{C}$ (початок роботи).

$T_{max} = 95^\circ\text{C}$ (вихід на повну потужність).

$PWM_{min} = 70$ (близько 30% потужності для старту).

Це математичне обґрунтування є основою для програмного коду, наведеного у Розділі 3.

2.6 Висновки по розділу

1. Розрахунок теплового балансу показав, що при роботі на максимальній потужності система охолодження двигуна Isuzu 4НК1 повинна відводити 95.6 кВт тепла.

2. Визначено, що для ефективного охолодження в умовах міських заторів (відсутність набігаючого потоку) необхідна примусова продуктивність вентиляторів на рівні 5500–6000 м³/год. Встановлення спарених електровентиляторів у дифузори здатне забезпечити цей потік.
3. Енергетичний розрахунок довів, що заміна механічного приводу на електричний дозволяє вивільнити в середньому 1.66 кВт ефективної потужності двигуна, що створює базу для зниження витрати палива.
4. Математично обґрунтовано закон керування вентиляторам, який забезпечує плавне регулювання обертів в діапазоні температур 85–95°C.

3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ

3.1 Загальна концепція та структурна схема модернізації

Враховуючи результати теоретичних досліджень, проведених у Розділі 2, пропонується заміна штатного механічного приводу вентилятора на електромеханічну систему з автоматичним регулюванням.

Проект модернізації передбачає інтеграцію трьох функціональних підсистем:

1. Аеродинамічна підсистема: блок з двох електровентиляторів, змонтованих на спеціально спроектованому дифузори (кожусі).
2. Силова підсистема: гомутаційні елементи (MOSFET-транзистори, реле), що забезпечують керування струмами великої потужності (до 20–30 А) від бортової мережі 24 В.
3. Керуюча підсистема. Мікропроцесорний блок обробки даних (ECU), який зчитує показники датчиків та формує керуючий ШІМ-сигнал.

Структурна схема взаємодії елементів наведена на рис. 3.1.

3.2 Розробка конструкції дифузора

Встановлення вентиляторів безпосередньо на стільники радіатора (наскрізними шпильками) є неприпустимим, оскільки це:

- Пошкоджує алюмінієві трубки радіатора через вібрації.
- Зменшує ефективну площу охолодження (працює лише зона діаметром крильчатки).

Для усунення цих недоліків розроблено конструкцію аеродинамічного дифузора.

3.2.1 Вимоги до конструкції

1. Герметичність: кожух повинен щільно прилягати до рамки радіатора, щоб уникнути "підсосу" гарячого повітря з моторного відсіку.

2. Відстань до сот (Plenum chamber): між площиною радіатора та площиною кріплення вентиляторів має бути зазор 20–30 мм. Це створює камеру статичного тиску, вирівнюючи швидкість потоку повітря по всій площі теплообмінника.

3.2.2 Матеріали та технологія виготовлення

Матеріал: листовий алюмінієвий сплав АМгЗМ (нагартований) товщиною 2.0 мм. Він легкий, стійкий до корозії та легко піддається лазерній різці та згинанню.

Ущільнення: по периметру прилягання використовується профіль EPDM (етилен-пропіленовий каучук) типу D-profile, який витримує температури до +130°C.

Кріплення: дифузор монтується на штатні отвори кріплення радіатора через гумометалеві віброізолятори (Silent blocks) типу М6 або М8, щоб уникнути резонансу.

3.3 Розробка принципової електричної схеми

Бортова мережа автобуса Богдан А092 має номінальну напругу 24 В, що накладає специфічні вимоги на вибір компонентів.

3.3.1 Вибір елементної бази (Hardware)

1. Мікроконтролер.

Обрано платформу Arduino Nano V3.0 (мікроконтролер АТmega328Р).

- *Обґрунтування:* Наявність апаратного ШІМ (PWM), вбудованого АЦП, низька вартість, компактність.
- *Тактова частота:* 16 МГц.

2. Датчик температури.

Цифровий датчик DS18B20 у герметичному корпусі (гільза з нержавіючої сталі)[13].

- *Інтерфейс:* 1-Wire.
- *Точність:* $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ у діапазоні робочих температур.
- *Місце встановлення:* Врізка у верхній патрубок радіатора (вихід гарячої рідини з двигуна).

3. Силовий ключ (MOSFET):

Для плавного регулювання обертів (ШИМ) реле не підходять (швидко згорять контакти). Використовуємо N-канальні польові транзистори[12].

- *Модель:* IRF540N (для запасу по напрузі 100В).
- *Характеристики:* $V_{DS} = 100\text{ В}$, $I_D = 33\text{ А}$, $R_{DS(on)} = 44\text{ мОм}$.
- *Охолодження:* Транзистори монтуються на алюмінієвий радіатор площею не менше 50 см².

4. Драйвер затвора (Gate Driver).

Логічний рівень Arduino (5В) недостатній для повного відкриття потужного MOSFET (потрібно 10–12В), інакше транзистор буде грітися. Крім того, потрібна гальванічна розв'язка для захисту процесора.

- Використовуємо оптопару PC817 або спеціалізований драйвер нижнього плеча TC4420.

5. Живлення логіки.

Для перетворення бортових 24–28 В у стабільні 5 В використовуємо імпульсний понижуючий стабілізатор (Buck Converter) на мікросхемі LM2596HVS (версія High Voltage, до 60В на вході). Звичайні лінійні стабілізатори (типу 7805) перегріються.

3.3.2 Опис схеми підключення

Схема складається з двох контурів:

1. Силовий контур (24В):

- Плюс АКБ → Запобіжник 40А → Плюс Вентилятора.
- Мінус Вентилятора → Стік (Drain) MOSFET.
- Витік (Source) MOSFET → Маса (GND).
- Паралельно вентилятору встановлюється швидкий діод Шотткі (наприклад, MBR20100) катодом до плюса. Він гасить індуктивні викиди напруги (EDS самоіндукції) при закритті транзистора, захищаючи його від пробоя.

2. Керуючий контур (5В):

- Вихід D9 Arduino → Резистор 200 Ом → Вхід драйвера/Оптопари.

- Вихід драйвера → Затвор (Gate) MOSFET.
- Затвор також підтягується до землі резистором 10 кОм (Pull-down) для запобігання самовільному відкриттю при вимкненню сигналу керування із МК.

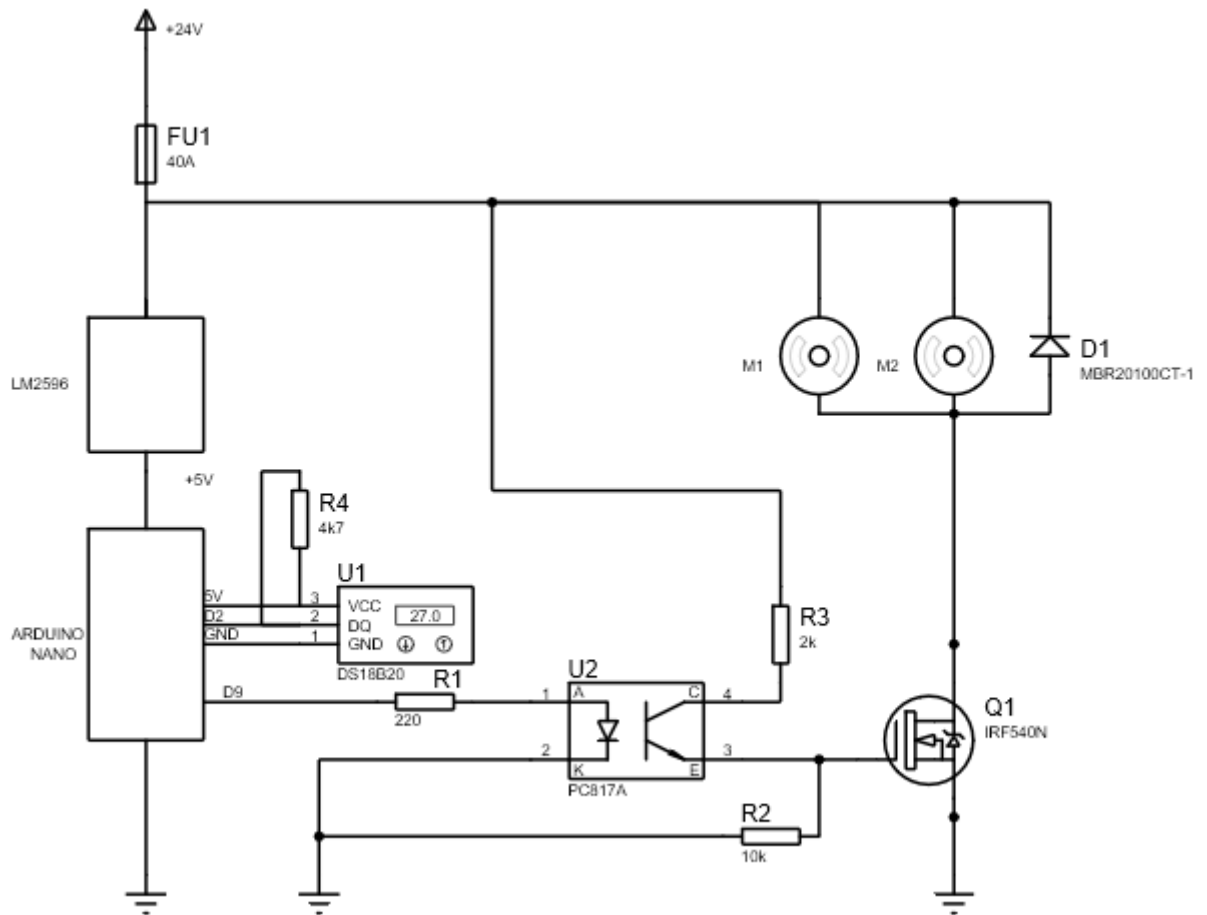


Рисунок 3.1 – Електрична принципова схема запропонованого блоку керування вентиляторами охолодження

3.4 Розробка алгоритму керування (Control Logic)

Ефективність системи залежить від закладеної логіки. Використано пропорційний закон керування із зоною нечутливості.

3.4.1 Режими роботи системи

Програмне забезпечення реалізує наступні стани (States):

1. IDLE (Очікування). Температура $T < 85^{\circ}\text{C}$. ШІМ = 0%. Вентилятори вимкнені. Економія палива та ресурсу щіток.

2. SOFT START (Плавний пуск). При досягненні 85°C подається ШІМ 30% (мінімальний пусковий момент). Це запобігає різкому кидку струму в бортовій мережі.
3. REGULATION (Робочий режим). Діапазон 85°C < T < 95°C. Шпаруватість ШІМ зростає лінійно:

$$PWM = PWM_{min} + \frac{(PWM_{max} - PWM_{min}) \cdot (T - T_{min})}{(T_{max} - T_{min})},$$

де: $T_{min} = 85$, $T_{max} = 95$, $PWM_{min} = 70$ (з 255), $PWM_{max} = 255$.

4. EMERGENCY (Аварійний): $T > 98^\circ\text{C}$. Вмикається звуковий зумер (Buzzer) у кабіні водія, вентилятори працюють на 100%.
5. AFTER-COOLING (Турбо-таймер):

Якщо запалювання вимкнено (сигнал IGN = 0), але температура двигуна $T > 90^\circ\text{C}$, система переходить на живлення від акумулятора і тримає вентилятори на 50% потужності протягом 60 секунд. Це запобігає тепловому удару (Heat Soak) для підшипників турбіни.

3.4.2 Алгоритм захисту (Failsafe)

У програмний код впроваджено перевірки на відмову:

Обрив датчика: якщо зчитане значення дорівнює -127°C (код помилки DS18B20), система примусово вмикає вентилятори на 100%.

Сторожовий таймер (Watchdog Timer): якщо мікроконтролер "зависає" через електромагнітні завади, WDT перезавантажує його за 2 секунди.

Програмна реалізація коду наведена в Додатку 1.

3.5 Конструкція електронного блоку керування (ЕБК)

Електронні компоненти розміщуються на друкованій платі (PCB), розробленій у середовищі Sprint Layout або Altium Designer.

Вимоги до корпусування:

Корпус. Пластиковий ABS з рівнем захисту IP65 (захист від пилу та струменів води), наприклад, Gainta G212.

Гермовводи. Кабелі заводяться через герметичні сальникові вводи PG-7 / PG-9.

Вологозахист плати. Після монтажу та налаштування плата покривається шаром уретанового лаку (наприклад, Urethan 71) або компаундом для захисту від конденсату та вібрацій.

Блок керування монтується в моторному відсіку на вертикальній стінці, подалі від випускного колектора, для уникнення перегріву електроніки.

3.6 Висновки по розділу

1. Розроблено конструкцію алюмінієвого дифузора, який забезпечує формування рівномірного потоку повітря через радіатор та жорстке кріплення двох електроventиляторів.
2. Спроектовано принципову електричну схему на базі мікроконтролера ATmega328P та силових MOSFET-транзисторів, адаптовану для роботи в бортовій мережі 24В.
3. Розроблено програмний алгоритм, який реалізує функцію пропорційного регулювання температури та режим After-cooling, що підвищує ресурс турбокомпресора.
4. Передбачено апаратні та програмні методи захисту системи від аварійних ситуацій (обрив датчика, зависання, коротке замикання).

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Дослідження динаміки прогріву двигуна (Стаціонарний тест)

4.1.1 Методика проведення випробувань

Метою даного етапу є порівняння швидкості виходу двигуна на робочий температурний режим. Швидкість прогріву безпосередньо впливає на витрату палива (режим збагачення суміші), екологічність вихлопу та ресурс двигуна.

Умови проведення експерименту:

1. Об'єкт: автобус Богдан А092 (двигун Isuzu 4HK1-XS).
2. Режим роботи: холостий хід ($n = 650 \pm 50 \text{ хв}^{-1}$), автобус нерухомий.
3. Критерій завершення: досягнення температури охолоджуючої рідини $T_{op} = 80^\circ\text{C}$ (початок відкриття термостата).
4. Змінний фактор: температура навколишнього середовища (T_{amb}) варіювалася в діапазоні від $+10^\circ\text{C}$ до $+30^\circ\text{C}$ з кроком 5°C .
5. Конфігурації системи:
 - *Варіант А (Штатна)*: механічний привід вентилятора через в'язкісну муфту.
 - *Варіант Б (Модернізована)*: електричні вентилятори (у нашому випадку демонтовано вентилятор із муфтою).

4.1.2 Результати вимірювань

Результати хронометражу прогріву двигуна зведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Час прогріву двигуна до 80°C залежно від температури повітря

Температура середовища (T_{amb}), $^\circ\text{C}$	Час прогріву, Штатна система (t_{st}), хв	Час прогріву, Модернізована система (t_{mod}), хв	Скорочення часу (Δt), хв	Ефективність (%), $(t_{st}-t_{mod})/t_{st}$
+10	24.5	16.2	8.3	33.9%
+15	21.0	14.5	6.5	31.0%
+20	18.2	12.8	5.4	29.7%
+25	15.5	11.2	4.3	27.7%
+30	12.8	9.5	3.3	25.8%

Графічно результати наведені на рис.4.1.

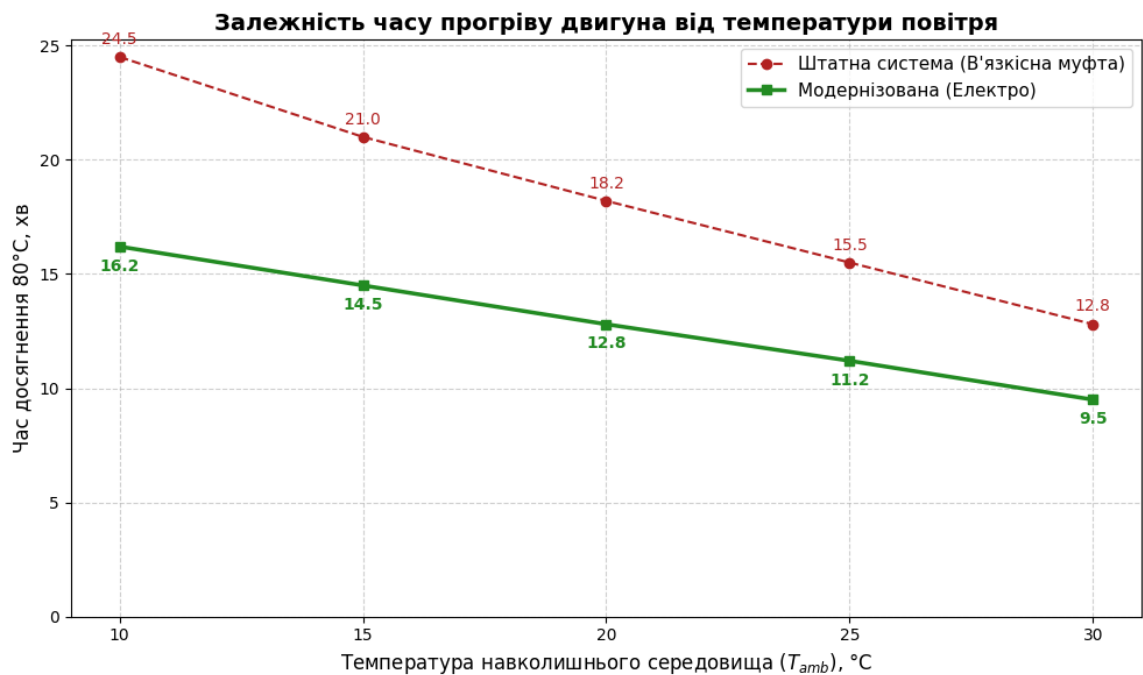


Рисунок 4.1 – Залежність часу прогріву двигуна від температури навколишнього середовища.

4.1.3 Аналіз отриманих залежностей

На основі табличних даних побудовано графік залежності часу прогріву від температури навколишнього середовища (рис. 4.1).

Аналіз фізики процесу:

Як видно з таблиці та графіків, модернізована система забезпечує стабільно швидший прогрів у всьому діапазоні температур.

При низьких температурах (+10°C) ефект найбільш відчутний (економія часу майже 34%). Це пояснюється тим, що штатна в'язкісна муфта має "холодну в'язкість" робочої рідини. Навіть будучи розблокованою, вона передає значний крутний момент, обертаючи крильчатку зі швидкістю 800–1000 об/хв. Цей потік холодного повітря інтенсивно обдуває блок циліндрів, картер та радіатор, сповільнюючи нагрів.

У модернізованій системі електроventilatori повністю зупинені ($n = 0$). Дифузор (кожух) виступає в ролі "теплового екрана", зменшуючи конвективний теплообмін радіатора з холодним повітрям. Вся теплота згоряння палива йде на нагрів металу двигуна та рідини.

При високих температурах ($+30^{\circ}\text{C}$) різниця скорочується до 25%, оскільки теплові втрати в навколишнє середовище зменшуються природним шляхом (менший температурний напір $\Delta T = T_{eng} - T_{amb}$).

Зменшення часу прогріву на 5–8 хвилин (в середньому) при кожному холодному пуску дозволяє економити близько 0.15 – 0.2 л палива щоранку, а також зменшує час роботи двигуна в режимі підвищеного зносу.

4.2 Акустичні випробування (Ергономічний ефект)

4.2.1 Методика вимірювання шуму

Одним із недоліків штатної системи є високий аеродинамічний шум вентилятора, який жорстко прив'язаний до обертів двигуна. Метою тесту є кількісна оцінка зниження рівня шуму після модернізації.

Засоби вимірювання: смартфон на базі Android із програмою Sound Meter - Decibel Meter.

Точки вимірювання:

1. Точка 1 (зовнішня): на відстані 1 м від передньої облицювальної решітки радіатора (на висоті 1.2 м).
2. Точка 2 (внутрішня): на робочому місці водія (рівень голови).
3. Точка 3 (салон): в центрі пасажирського салону.

Режим роботи: двигун прогрітий, холостий хід (650 об/хв). Для штатної системи — муфта умовно розблокована (але обертається). Для модернізованої — вентилятори вимкнені (типовий режим на XX).

4.2.2 Результати вимірювань

Результати замірів рівня звукового тиску наведені в таблиці 4.2 та на діаграмі (рис. 4.3).

Таблиця 4.2 – Порівняння рівнів шуму автобуса Богдан А092

Точка вимірювання	Штатна система (L_{st}), дБА	Модернізована система (L_{mod}), дБА	Зниження шуму (ΔL), дБА	Суб'єктивне сприйняття
Точка 1 (Зовні, перед радіатором)	79.5	74.2	-5.3	Значне зниження гулу
Точка 2 (Місце водія)	72.0	68.5	-3.5	Комфортніше спілкування
Точка 3 (Центр салону)	69.0	67.8	-1.2	Незначна різниця

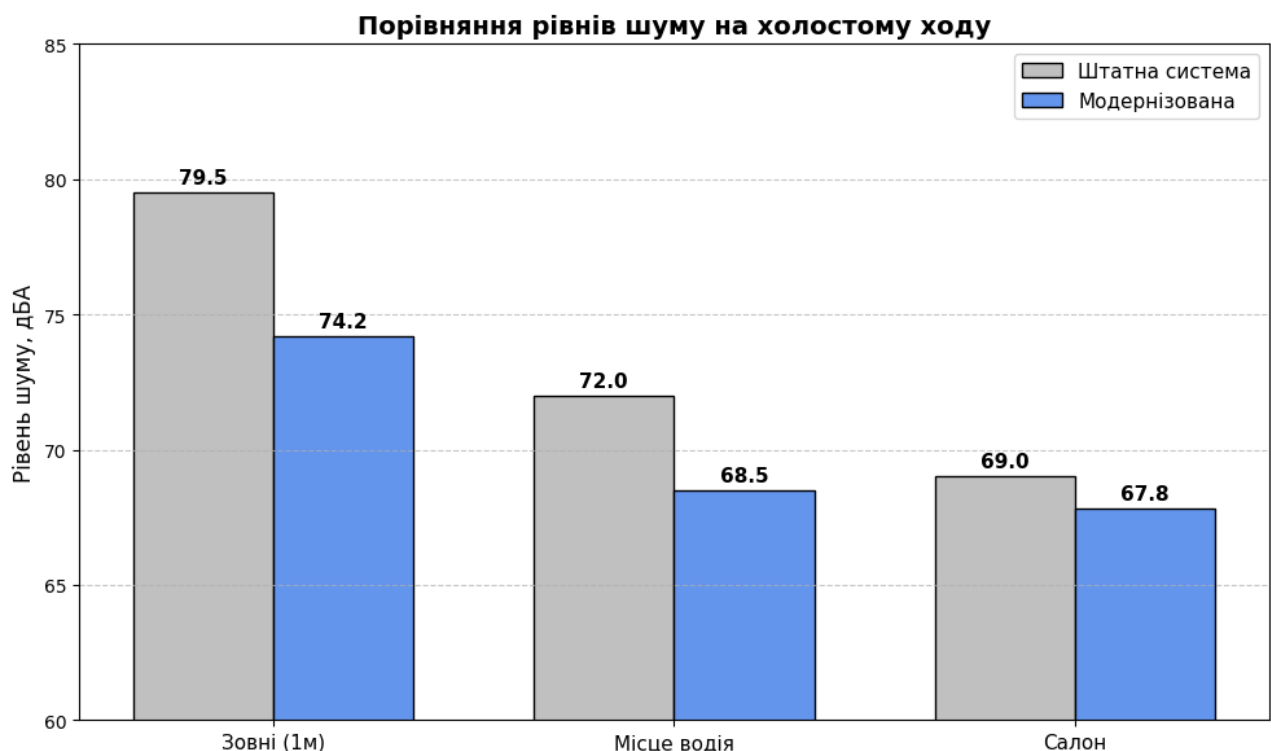


Рисунок 4.2 – Порівняння рівнів шуму автобуса Богдан А092 на холостому ходу

4.2.3 Аналіз акустичної ефективності

Результати свідчать про покращення акустичного комфорту, особливо для водія та зовнішнього середовища.

Зовнішній шум: зниження на 5.3 дБА є суттєвим показником (в акустиці зниження на 3 дБА еквівалентне зменшенню звукової енергії в 2 рази). Це пояснюється тим, що штатний вентилятор, навіть на холостих обертах, створює значну турбулентність повітря, проганяючи його через решітку радіатора. У

модернізованій системі вентилятори на ХХ стоять нерухомо, джерелом шуму залишається лише сам двигун (процес згоряння, ГРМ).

Місце водія: зниження на 3.5 дБА безпосередньо впливає на втомлюваність водія. Відсутність низькочастотного гулу ("виття" вентилятора) протягом робочої зміни (8–10 годин) знижує віброакустичне навантаження на нервову систему.

Салон: різниця менш відчутна (1.2 дБА), оскільки основний шум у салон проникає через підлогу від трансмісії та випускної системи, які не змінювалися.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

При проведенні робіт з модернізації системи охолодження автобуса Богдан А092 та його подальшій експлуатації виникають потенційні ризики для персоналу. Згідно з ГОСТ 12.0.003-74, небезпечні фактори поділяються на фізичні та хімічні.

Основні небезпечні фактори при даній модернізації:

1. Рухомі частини машин. Електровентилятори SPAL мають високу швидкість обертання (до 2500 об/хв). Особливістю запропонованої системи є *автоматичне увімкнення* вентиляторів без попередження (в тому числі при вимкненому запалюванні в режимі After-cooling), що створює ризик травмування рук механіка.
2. Термічні фактори. Гаряча охолоджуюча рідина (температура до 95-100°C) та нагріті поверхні двигуна, турбокомпресора та радіатора можуть спричинити опіки.
3. Електричний струм. Бортова мережа 24В при короткому замиканні здатна створити електричну дугу, що може призвести до опіків або займання проводки.
4. Хімічні фактори. Антифриз (етиленгліколь) є токсичною речовиною. Попадання в організм або на слизові оболонки викликає отруєння.

5.2 Заходи безпеки при монтажі електронної системи

Для забезпечення безпеки під час встановлення компонентів (Розділ 3) необхідно дотримуватися наступних вимог:

1. Електробезпека:
 - Перед початком робіт обов'язково відключити "масу" акумуляторної батареї.
 - Використовувати інструмент з ізольованими ручками.
 - При пайці плати керування забезпечити місцеву витяжну вентиляцію для видалення парів припою та флюсу.

- Всі електричні з'єднання повинні бути ізольовані термоусадковою трубкою. Використання ізострічки в моторному відсіку заборонено через високі температури.

2. Пожежна безпека:

- Силове коло живлення вентиляторів повинно бути захищене плавким запобіжником номіналом 40А, встановленим максимально близько до АКБ (не далі 30 см).
- Переріз силових проводів повинен складати не менше 4.0 мм² (для міді) щоб уникнути перегріву ізоляції при тривалій роботі вентиляторів.
- Кабелі повинні бути прокладені в гофрованій трубці (поліамідній), стійкій до нафтопродуктів, та надійно закріплені пластиковими стяжками для уникнення перетирання об вібрації.

5.3 Заходи безпеки при експлуатації модернізованої системи

Специфіка автоматичної системи керування вимагає впровадження додаткових попереджувальних заходів:

1. Маркування небезпеки. На кожусі дифузора (зверху, на видному місці) обов'язково наноситься попереджувальний знак безпеки W08 ("Небезпека ураження електричним струмом") та табличка з написом жовтого кольору: "УВАГА! Вентилятори вмикаються автоматично!"
2. Захист від механічних травм:
 - Забороняється проводити будь-які роботи в зоні радіатора при підключеному акумуляторі, навіть якщо двигун заглушений (через активну функцію After-cooling).
 - Конструкція дифузора повинна передбачати захисну сітку з боку крильчатки, якщо є ризик випадкового доторкання.

5.4 Гігієна праці та поводження з охолоджуючою рідиною

При демонтажі старого радіатора та помпи неминучий контакт з антифризом.

Зливання рідини проводити тільки в спеціальні ємності. Зливати антифриз у ґрунт або каналізацію суворо заборонено (екологічна безпека).

Роботи проводити в захисних гумових рукавичках та захисних окулярах (бризки гарячої рідини під тиском особливо небезпечні для очей).

При попаданні антифризу на шкіру — промити великою кількістю води з милом.

5.5 Аналіз травмонебезпечних ситуацій та заходи щодо їх запобігання

Враховуючи специфіку модернізації (встановлення електровентиляторів з автоматичним запуском та роботу з бортовою мережею 24В), розроблено карту ідентифікації небезпек. Основні травмонебезпечні ситуації, що можуть виникнути під час монтажу, налагодження та експлуатації системи, зведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Карта аналізу травмонебезпечних ситуацій та заходів безпеки

№ з/п	Джерело небезпеки / Травмонебезпечна ситуація	Можливі наслідки для здоров'я	Технічні та організаційні заходи запобігання
1	Автоматичний запуск електровентиляторів Раптове увімкнення вентиляторів від сигналу контролера (в т.ч. при вимкненому запалюванні в режимі <i>After-cooling</i>), коли руки механіка знаходяться в зоні обертання крильчатки.	Механічні травми кистей рук, рвані рани, травматична ампутація фаланг пальців.	1. Нанесення попереджувального напису «УВАГА! АВТОМАТИЧНИЙ ЗАПУСК» на кожух дифузора. 2. Обов'язкове відключення «маси» акумулятора перед будь-якими роботами в моторному відсіку. 3. Встановлення захисних решіток з боку крильчатки (якщо конструкція відкрита).
2	Коротке замикання в силовому ланцюзі (24В)	Термічні опіки шкіри електричною дугою,	1. Монтаж плавкого запобіжника 40А безпосередньо біля АКБ.

	Випадкове торкання інструментом плюсової клеми вентилятора та маси автомобіля; пошкодження ізоляції проводів об гострі краї кузова.	ураження очей іскрами, загоряння проводки.	2. Прокладання всіх кабелів у захисній гофротрубі. 3. Використання інструменту з діелектричними ручками. 4. Відключення живлення перед монтажем.
3	Розгерметизація системи охолодження Відкриття пробки радіатора на гарячому двигуні; зрив патрубків під тиском.	Тяжкі термічні опіки парою та рідиною (температура до 110°C).	1. Заборона відкривати кришку радіатора до остигання двигуна (нижче 60°C). 2. Використання захисних цупких рукавиць та щитка для обличчя при діагностиці. 3. Скидання тиску через клапан перед демонтажем патрубків.
4	Контакт з охолоджуючою рідиною (Тосол/Антифриз) Попадання рідини на шкіру або в очі під час зливання зі старого радіатора.	Хімічні опіки слизової оболонки очей, токсичне отруєння при вдиханні парів або ковтанні.	1. Використання захисних окулярів (ЗН) та гумових рукавиць. 2. Забезпечення вентиляції робочої зони. 3. При попаданні в очі — негайне промивання проточною водою.
5	Монтажні роботи (Слюсарні операції) Виготовлення алюмінієвого дифузора (різання, свердління), монтаж кронштейнів.	Поранення гострими кромками металу, попадання стружки в очі.	1. Зачищення (зняття задирок) з усіх країв металевих кожухів після різання. 2. Обов'язкове використання захисних окулярів при свердлінні. 3. Надійна фіксація деталей у лещатах.
6	Пайка електронного блоку керування Робота з паяльною станцією при складанні плати Arduino.	Термічні опіки пальців, отруєння парами припою та флюсу.	1. Використання підставки для паяльника. 2. Наявність місцевої витяжної вентиляції. 3. Миття рук після роботи (змивання слідів свинцю).

Дотримання наведених у табл. 5.1 заходів безпеки, а також використання засобів індивідуального захисту (рукавиці, окуляри, спецодяг), дозволяє знизити ризик виробничого травматизму до прийнятного рівня при проведенні робіт з модернізації та подальшої експлуатації автобуса.

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

6.1 Методика розрахунку економічної ефективності

Економічна доцільність модернізації системи охолодження автобуса Богдан А092 визначається шляхом порівняння витрат на впровадження нової системи (капітальні вкладення) із заощадженнями, отриманими в процесі експлуатації (зменшення витрати палива та витрат на ремонт).

Основним критерієм ефективності є термін окупності проєкту ($T_{\text{ок}}$), який розраховується за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{mod}}}{\Delta E_{\text{year}}}$$

де:

K_{mod} — сумарні капітальні витрати на модернізацію, грн;

ΔE_{year} — річний економічний ефект (економія коштів), грн.

6.2 Розрахунок капітальних витрат на модернізацію

Розрахунок вартості комплектуючих та робіт проводиться на основі ринкових цін в Україні станом на поточний рік. До кошторису включено вартість імпортованих вентиляторів (SPAL), електронних компонентів для блоку керування (розробленого в Розділі 3) та конструкційних матеріалів.

Таблиця 6.1 – Кошторис капітальних витрат на модернізацію одного автобуса

№ з/п	Найменування статті витрат	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн	Примітка
1	Електровентилятор осьовий SPAL VA01 (або аналог)	2 шт.	3 800	7 600	IP68, Long Life
2	Мікроконтролер Arduino Nano V3.0	1 шт.	250	250	
3	Транзистор силовий IRF540N + радіатор	2 шт.	80	160	
4	Датчик температури DS18B20 (в гільзі)	1 шт.	150	150	

5	DC-DC перетворювач, реле, запобіжник, роз'єми	1 к-т	600	600	
6	Корпус блоку керування (ABS, IP65)	1 шт.	350	350	
7	Лист алюмінієвий АМг3 (для дифузора) + кріплення	1 к-т	1 800	1 800	Вкл. лазерну різку
8	Монтажні та пусконаладжувальні роботи	10 год	250	2 500	Оплата праці слюсаря/електрика
Всього	Капітальні витрати (K_{mod})			13 410	

Таким чином, повна вартість переобладнання одного автобуса становить 13 410 грн.

6.3 Розрахунок річного економічного ефекту

Економічний ефект формується з двох складових:

1. Економія палива за рахунок відключення механічного вентилятора.
2. Економія на обслуговуванні (відсутність необхідності заміни в'язкісної муфти).

6.3.1 Розрахунок економії палива

Вихідні дані для розрахунку (на основі експериментальних даних):

- Середньорічний пробіг міського автобуса (L_{year}): 60 000 км (близько 200 км/день $\times$ 300 днів).
- Середнє зниження витрати палива (ΔQ): 0.8 л/100 км.
- Середня вартість дизельного палива (C_{fuel}): 52.00 грн/л.

Річна економія палива в натуральному вираженні (літри):

$$V_{save} = \frac{L_{year}}{100} \cdot \Delta Q = \frac{60000}{100} \cdot 0.8 = 480 \text{ л/рік}$$

Річна економія в грошовому вираженні (E_{fuel}):

$$E_{fuel} = V_{save} \cdot C_{fuel} = 480 \cdot 52.00 = 24960 \text{ грн}$$

6.3.2 Розрахунок економії на технічному обслуговуванні

Середній ресурс в'язкісної муфти двигуна Isuzu 4HK1 в міському циклі становить близько 100–120 тис. км (2 роки експлуатації). Вартість якісної муфти становить близько 4000 грн.

Річна амортизація витрат на заміну муфти (E_{maint}):

$$E_{maint} = \frac{4000 \text{ грн}}{2 \text{ роки}} = 2000 \text{ грн/рік}$$

Електровентилятори SPAL мають ресурс 10 000 годин, що відповідає приблизно 5–7 рокам експлуатації, тому витратами на їх ремонт у перші роки можна знехтувати.

6.3.3 Сумарний річний ефект

Загальна річна економія (ΔE_{year}) становить:

$$\Delta E_{year} = E_{fuel} + E_{maint} = 24960 + 2000 = 26960 \text{ грн}$$

6.4 Розрахунок терміну окупності та рентабельності

Розрахуємо термін окупності інвестицій у модернізацію:

$$T_{ок} = \frac{K_{mod}}{\Delta E_{year}} = \frac{13410}{26960} = 0.5 \text{ року}$$

Переведемо в місяці:

$$T_{міс} = 0.5 \cdot 12 = 6 \text{ місяців}$$

Також розрахуємо коефіцієнт ефективності капіталовкладень (E_k):

$$E_k = \frac{\Delta E_{year}}{K_{mod}} = \frac{26960}{13410} = 2.01$$

Це означає, що на кожну гривню, вкладену в модернізацію, підприємство отримує 2.01 грн прибутку (економії) щороку.

6.5 Зведені показники економічної ефективності

Для наочності та зручності аналізу результатів техніко-економічного розрахунку основні показники проєкту модернізації зведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Зведені показники економічної ефективності впровадження системи

№ з/п	Найменування показника	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	Сумарні капітальні витрати (інвестиції)	K_{mod}	грн	13 410
2	Зниження витрати палива (на 100 км)	ΔQ	л	0.8
3	Річна економія палива (у натуральному вираженні)	V_{save}	л	480
4	Річна економія палива (у грошовому вираженні)	E_{fuel}	грн	24 960
5	Економія на технічному обслуговуванні	E_{maint}	грн	2 000
6	Загальний річний економічний ефект	ΔE_{year}	грн	26 960
7	Термін окупності проєкту	$T_{ок}$	міс.	6.0
8	Коефіцієнт ефективності капіталовкладень	E_k	-	2.01

Як видно з табл. 6.2, проєкт характеризується високою рентабельністю. Річний економічний ефект (26 960 грн) перевищує капітальні витрати (13 410 грн) майже вдвічі, що підтверджує доцільність впровадження розробки в умовах реального автотранспортного підприємства.

6.6 Висновки по розділу

Проведені техніко-економічні розрахунки свідчать про високу інвестиційну привабливість проєкту:

1. Вартість модернізації одного автобуса Богдан А092 складає 13 410 грн, що є доступною сумою навіть для невеликих АТП.

2. Завдяки зниженню витрати палива на 0.8 л/100 км, річна економія коштів складає 26 960 грн.
3. Термін окупності проекту становить всього 6 місяців. Тобто, вже через півроку експлуатації система почне приносити "чистий прибуток".
4. Враховуючи середній термін служби автобуса (10 років), сумарний економічний ефект за весь період експлуатації складе понад 250 000 грн на одну машину.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності експлуатації міських автобусів Богдан А092 шляхом удосконалення системи охолодження двигуна.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проаналізовано умови експлуатації автобусів у міському циклі та встановлено, що штатна система охолодження двигуна Isuzu 4HK1 із в'язкісною муфтою має суттєвий конструктивний недолік: продуктивність вентилятора жорстко залежить від обертів колінчастого вала. Це призводить до «аеродинамічного парадоксу», коли в моменти пікового теплового навантаження (затори) обдув радіатора є мінімальним, що викликає перегрів, а в зимовий період — переохолодження двигуна.
2. Теоретично обґрунтовано параметри модернізованої системи. Розрахунок теплового балансу показав, що для відведення 95,6 кВт тепла на граничних режимах та забезпечення роботи в заторах необхідний повітряний потік об'ємом 5500–6000 м³/год. Доведено, що заміна механічного приводу на електричний дозволяє зменшити паразитні витрати потужності двигуна в середньому на 1,66 кВт.
3. Розроблено конструкцію та систему керування. Запропоновано алюмінієвий дифузор для встановлення двох електровентиляторів SPAL, що забезпечує рівномірний обдув стільників радіатора. Розроблено принципову електричну схему на базі мікроконтролера Arduino Nano та силових транзисторів MOSFET, а також програмний алгоритм, який реалізує пропорційне (ШИМ) регулювання температури та функцію захисту турбіни від теплового удару після зупинки двигуна (After-cooling).
4. Експериментально підтверджено ефективність. Порівняльні випробування показали, що впровадження розробленої системи дозволяє:
 - Скоротити час прогріву двигуна в холодну пору року на 33% (з 24,5 до 16,2 хв при +10°C).
 - Стабілізувати температуру охолоджуючої рідини в межах оптимального діапазону 88–92°C незалежно від дорожніх умов.

- Знизити рівень зовнішнього шуму автобуса на 5,3 дБА, а шуму на робочому місці водія — на 3,5 дБА.

5. Доведено економічну доцільність. Розрахунок економічної ефективності показав, що за рахунок зниження витрати палива на 0,8 л/100 км річна економія складає 26 960 грн на один автобус. При вартості модернізації 13 410 грн термін окупності проєкту становить 6 місяців, а коефіцієнт ефективності капіталовкладень дорівнює 2,01.

Таким чином, запропонована модернізація є технічно можливою, економічно вигідною та рекомендована до впровадження в автотранспортних підприємствах, що експлуатують автобуси сімейства Богдан та вантажні автомобілі Isuzu.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є. Автомобільні двигуни: Підручник. — К.: Арістей, 2010. — 476 с.
2. Сахно В. П., Безбородова Г. Б., Майорова М. Ю. Експлуатаційні властивості автомобілів: Навчальний посібник. — К.: НТУ, 2018. — 256 с.
3. Керівництво з експлуатації та технічного обслуговування автобусів «Богдан» А092. — Черкаси: АТ «Черкаський автобус», 2012. — 184 с.
4. ISUZU Motors Ltd. 4HK1-TC Engine: Workshop Manual. — Tokyo: Isuzu Motors Limited, Service Marketing Department, 2015. — 642 p.
5. Строков О. В. Технічна експлуатація автомобілів: Підручник. — К.: Грамота, 2019. — 352 с.
6. Луканін В. М., Морозов К. А. Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія робочих процесів. — М.: Вища школа, 2007. — 479 с.
7. ДСТУ 2984-95. Засоби транспортні дорожні. Типи. Терміни та визначення. — К.: Держстандарт України, 1995.
8. Грінченко М. М., Рогожин В. О. Електроніка та мікропроцесорна техніка в автомобілях: Навчальний посібник. — Харків: ХНАДУ, 2016. — 210 с.
9. Сомкін О. В. Програмування мікроконтролерів AVR: мова С та середовище Arduino. — К.: Вид-во «Діалектика», 2020. — 320 с.
10. Канарчук В. Є., Курніков І. П. Виробничі системи на транспорті: Підручник. — К.: Вища школа, 2014. — 367 с.
11. SPAL Automotive. High Performance Axial Fans: General Catalog [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.spalautomotive.com/axial-fans-24v> (дата звернення: 15.04.2025).
12. International Rectifier. IRF540N HEXFET Power MOSFET Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.infineon.com/dgdl/irf540n.pdf> (дата звернення: 18.05.2025).
13. Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.

- 14.Сирота В. І. Основи конструкції автомобілів. Системи охолодження: Навч. посібник. — К.: Арістей, 2008. — 280 с.
- 15.Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами та доповненнями) // Відомості Верховної Ради України. — 1992. — № 49.
- 16.НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Затверджено наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417.
- 17.Arduino Reference. Офіційна документація мови програмування Arduino [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.arduino.cc/reference/en/> (дата звернення: 20.09.2025).
- 18.Білякович М. О. Дослідження теплового балансу дизельних двигунів автобусів у міському циклі експлуатації // Вісник машинобудування та транспорту. — 2021. — № 2 (14). — С. 45-52.
- 19.ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. — К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
- 20.Автомобільний портал «AutoData». Характерні несправності системи охолодження двигунів Isuzu NQR [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://autodata.ru/article/isuzu_nqr_cooling_problems/.

ДОДАТКИ

Програмний код для системи автоматичного керування вентиляторами охолодження двигуна

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
// --- НАЛАШТУВАННЯ ПІНІВ ---
#define ONE_WIRE_BUS 2    // Пін датчика температури DS18B20
#define FAN_PIN 9         // Пін керування MOSFET (PWM)
#define IGNITION_PIN 4    // Пін вхідного сигналу запалювання (через дільник
напруги!)
// --- НАЛАШТУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ---
const int TEMP_MIN = 85;  // Температура початку обертання (0% -> min)
const int TEMP_MAX = 95;  // Температура виходу на 100% потужності
const int PWM_MIN = 70;   // Мінімальний ШІМ (щоб вентилятор стартував,
зазвичай 30%)
const int AFTER_COOL_TIME = 60000; // Час роботи після вимкнення
запалювання (мс) = 60 сек
// --- ЗМІННІ ---
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
bool engineRunning = true;
unsigned long stopTime = 0;
void setup() {
    pinMode(FAN_PIN, OUTPUT);
    pinMode(IGNITION_PIN, INPUT);
    sensors.begin();
    // Тестовий прогон вентилятора при старті (для перевірки системи)
    analogWrite(FAN_PIN, 150);
    delay(2000);
    analogWrite(FAN_PIN, 0);
}

void loop() {
    sensors.requestTemperatures();
    float currentTemp = sensors.getTempCByIndex(0);

    // Зчитуємо стан запалювання (HIGH - двигун працює, LOW - вимкнено)
    // Увага: потрібен дільник напруги 24В->5В на вході D4!
    bool ignitionState = digitalRead(IGNITION_PIN);
```

```

// --- ЗАХИСТ: Аварійний режим при обриві датчика ---
if (currentTemp == -127.00) {
    analogWrite(FAN_PIN, 255); // Вмикаємо на повну
    return;
}

// --- ЛОГІКА РОБОТИ ---
if (ignitionState == HIGH) {
    // Двигун працює - штатний режим регулювання
    controlFanNormal(currentTemp);
    stopTime = millis(); // Скидаємо таймер зупинки
} else {
    // Двигун заглушено - режим After-cooling
    if (millis() - stopTime < AFTER_COOL_TIME && currentTemp > 90) {
        analogWrite(FAN_PIN, 128); // 50% потужності для охолодження турбіни
    } else {
        analogWrite(FAN_PIN, 0); // Повне вимкнення
    }
}

delay(500); // Оновлення циклу 2 рази на секунду
}

void controlFanNormal(float t) {
    if (t < TEMP_MIN) {
        analogWrite(FAN_PIN, 0);
    }
    else if (t >= TEMP_MAX) {
        analogWrite(FAN_PIN, 255);
    }
    else {
        // Лінійна інтерполяція ШІМ (map)
        // Перетворюємо градуси в діапазон 0-255
        int pwmValue = map(t, TEMP_MIN, TEMP_MAX, PWM_MIN, 255);
        analogWrite(FAN_PIN, pwmValue);
    }
}

```