

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

РУБАН ДМИТРО ПЕТРОВИЧ

УДК 629.113

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ПРОГНОСТИЧНОЇ ОЦІНКИ ТА
ФОРМУВАННЯ РЕСУРСУ КУЗОВІВ АВТОБУСІВ

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

Галузь знань 05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


Д. П. Рубан

Львів 2024

АНОТАЦІЯ

Рубан Д. П. Науково-прикладні основи прогностичної оцінки та формування ресурсу кузовів автобусів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.02 «Автомобілі та трактори». – Львівський національний університет природокористування Міністерства освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2024.

Актуальність теми.

Кузов автобуса, як визначальний елемент конструкції, в процесі експлуатації внаслідок корозії та втомної міцності зазнає змін та є визначальним з точки зору законодавчих, регламентованих вимог щодо пасивної безпеки (Правил ЄЕК ООН № 52, 66, 107). Дані чинники є вирішальними у практиці країн ЄС при проведенні обов'язкових технічних контролів автобусів громадського транспорту, але що принаймні поки ще є відсутніми у відновленій нормативній базі України (ДСТУ 3649: 2010) та й інших пострадянських країнах.

У рамках приєднання України до країн-учасниць Женевської угоди 1958 р. (Закон України № 8048-IV від 20.02.2000 р.) проектування кузовів автобусів і наступна оцінка (сертифікаційні випробування) вже здійснюються згідно умов відповідності вимогам пасивної безпеки (допустимий рівень деформації кузова при перекиданні на бік – Правила ЄЕК ООН № 66 та № 107, чи статичному навантаженні на дах – для автобусів категорії М2 Правил ЄЕК ООН № 52). Однак у процесі експлуатації унаслідок корозії і втомної міцності металу (під впливом різних характеристик нерівностей дороги та пасажиронавантаженості/пасажиропотоку) фізико-механічні властивості металу каркасу кузова вцілому зазнають значних змін (у сторону погіршення), внаслідок чого через певний термін експлуатації кузов уже не відповідає

нормативним вимогам пасивної безпеки і потребує вибракування чи відновлювального ремонту.

Відповідно це обумовлює два основні напрямки досліджень:

– опрацювання методів забезпечення необхідного рівня характеристик міцності каркасів кузовів в цілому з умов впливу корозії і втомної міцності під час експлуатації ще на стадії проєктування і виробництва автобусів;

– опрацювання методів технічного контролю відповідності кузова під час експлуатації нормативним вимогам пасивної безпеки (як умови допуску до подальшої експлуатації у системі громадського транспорту).

Актуальність останнього обумовлена і умовами приєднання України до Гаазької конвенції про дорожній рух та розгортанням системи обов'язкового періодичного технічного контролю автомобілів/автобусів, як умови допуску до експлуатації на наступний лімітований період часу. Пострадянська законодавча база у цій сфері (ДСТУ 3649:2010 і інші) поки що не передбачає чітких технічних критеріїв кількісної, порогової оцінки значимих характеристик кузова як умови відповідності та прогнозування допуску до подальшої експлуатації.

Таким чином, розробка теоретичних основ розрахунку ресурсу кузова автобуса на етапі проєктних робіт під певні умови експлуатації з умов відповідності законодавчій нормативній базі щодо пасивної безпеки конструкції, а також відповідного вдосконалення технології виробництва є актуальною науково-прикладною проблемою.

У дисертаційній роботі обґрунтована методологія оцінки безпечності експлуатації кузовів автобуса з умов корозії та втомної міцності, в рамках якої:

– запропоновано метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з урахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності [47, 90, 97, 99];

– запропоновано методику оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації та відповідні пропозиції доповнення-зміни до

ДСТУ 3649: 2010 (аналогічно до загальноєвропейської практики) [99, 156, 157, 159];

– опрацьовано практичні рекомендації щодо проєктування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу [125, 131, 138];

– дана кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова [88, 90, 91, 99];

– вдосконалено методика моделювання-розрахунку напружено-деформованого стану кузова на базі методу скінченних елементів із врахуванням впливу корозії і втомної міцності металу каркасу та оцінка відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки [86, 99];

– проведено дослідження, які підтверджують погіршення матеріалу каркасу кузова в процесі експлуатації та оцінку адекватності результатів моделювання - розрахунку [54, 100, 106];

– розроблено рекомендації з підвищення довговічності кузовів автобусів під час експлуатації [130];

– обґрунтовано наслідки введення площадок низького входу «low-entry» у структуру несівного кузова та їх вплив на ресурсні характеристики автобусів [8];

– проведено аналіз досліджень з визначення раціональних термінів експлуатації автобусів та опрацьовано статистичні дані по витратах у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів [16, 77];

– застосовано системний підхід щодо аналізу структури парку автобусів громадського транспорту та ситуації в Україні щодо впливу тривалих термінів експлуатацію на безпечність перевезення пасажирів [55];

– застосовано системний підхід щодо формування пасажиропотоків та відповідної пасажиромісткості автобусів, що є невід'ємною складовою формування ресурсу автобусів у процесі експлуатації [55, 59, 60];

– обґрунтовано наслідки несвочасного регулювання кутів встановлення керованих коліс автобуса на довговічність його кузова [162].

Найбільш важливими роботами в цьому напрямі є дослідження зарубіжних та вітчизняних вчених, серед яких варто виділити наступних: Л. В. Крайник, О. З. Горбай, П. П. Мельничук, Р. А. Акоюн, І. І. Кельман, П. А. Фомичов, К. Е. Голенко, В. М. Хрунь, В. Є. Канарчук, В. С. Лукінський, М. І. Віршовкін, Н. С. Зайниддінов, Д. С. Львов, Ю. А. Зиков, В. І. Похмурський, М. Керка, М. Керка Jr., J. Dzugan, P. Konopik, J. Václavík, J. Chvojan, Y. Boutar, B. V. Farahania та ін. Провівши аналіз існуючих досліджень із визначення довговічності та раціональних термінів експлуатації автобусів встановлено, що відсутні дослідження із визначення ресурсу автобусів громадського транспорту з несівним кузовом та на рамному шасі, які одночасно поєднували б вагомні чинники впливу: властивості дорожнього покриття (мікропрофіль дороги), завантаження пасажирами, швидкість руху автобуса та корозію.

Відомо, що автобусний парк громадського транспорту в Україні за середнім строком експлуатації автобусів є найстарішим у Європі і за цим показником перевищує рекомендаційні регламенти ФРН, Франції, країн Скандинавії щодо термінів експлуатації на регулярних пасажирських маршрутах. Досить невелика частка автобусів в Україні має терміни експлуатації 5–10 років. Однак і при таких термінах експлуатації автобуси можуть не відповідати вимогам Правил № 66 та № 107 ЄЕК ООН, що пояснюється деградацією матеріалу елементів каркасу кузова та супроводжується постійним зростанням експлуатаційних витрат. При термінах експлуатації від п'яти років значна частка автобусів, особливо тих, що експлуатуються у містах - мільйонниках, вже потребують відновлювальних ремонтів. Такі ремонти в основному можуть проводитись без дотримання заводських технологій виготовлення та без використання спеціального оснащення, що негативно впливає на забезпечення відповідності Правилам № 66 та № 107 ЄЕК ООН.

В роботі було визначено динаміку експлуатаційних витрат у функції часу, яка показує, що експлуатаційні витрати починають зростати після двох років експлуатації (при пробігах від 100 тис. км). Витрати різко зростають при термінах експлуатації понад вісім років. Встановлено, що основним чинником, що спричиняє витрати, є дефекти кузова автобуса. При термінах експлуатації від п'яти до дев'яти років автобус потребує відновлювального ремонту, оскільки елементи каркасу кузова пошкоджені під дією структурної корозії та втомного руйнування. Відновлювальний ремонт кузова триває близько тридцяти днів, що додатково спричиняю збитки від простою (еквівалентно 75–170 доларів США за день).

Опрацьовано дані з реальної практики експлуатації автобусів по існуючій системі поточних та відновлювальних ремонтів автобусів громадського транспорту. Встановлено, що в основному автобуси ремонтуються силами автотранспортних підприємств (це дозволяє зменшити витрати на відновлювальний ремонт), або на сторонніх організаціях, які проводять відновлювальні ремонти кузовів без дотримання заводських технологій та без використання спеціального оснащення. В результаті таких ремонтів довговічність автобуса може збільшитись лише на 2–3 роки, що можна було б реалізувати на етапі проектування при розробці прогресивних технічних рішень та своєчасним оновленням антикорозійного захисту в процесі експлуатації.

При формуванні критичних термінів служби автобусів на основі даних експлуатуючих організацій встановлено, що основною складовою, що обмежує ресурс автобуса, є його кузов, несправність якого (поломки, тріщини, структурна корозія) потребує негайної постановки на відновлювальний ремонт. Також встановлено, що автобуси без візуальних пошкоджень продовжують експлуатацію, не дивлячись на те, що характеристики матеріалу каркасу в процесі деградації вже не забезпечують належну міцність кузова.

При розробці методичних засад відновлювальних ремонтів кузовів автобусів доведено, що класичні методи проведення відновлювальних ремонтів власними силами автотранспортного підприємства, або аналогічних ремонтних

організацій не дозволяють забезпечити належну довговічність та відповідність кузова автобуса вимогам щодо пасивної безпеки згідно Правил № 66 ЄЕК ООН по причині відсутності методів контролю елементів, що не мають візуальних пошкоджень. Тому для підвищення ефективності відновлювальних ремонтів пропонується їх проводити в заводських умовах за результатами належним чином проведеної дефектації та використання новітніх технологій та сучасних матеріалів.

Методика оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації дозволяє доповнити ДСТУ 3649: 2010 пунктами, що відповідають вимогам загальноєвропейської практики. Це дозволить під час регулярних технічних контролів виявити невідповідність вимогам до Правил № 66 ЄЕК ООН при використанні спеціальних засобів вимірювання та методів діагностики.

Розроблений метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з урахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності дозволяє виконувати розрахунок ресурсу кузовів автобусів несівної конструкції та на рамному шасі. Для повноцінного врахування реалій експлуатації розроблено модель, яка описує передачу на кузов автобуса поштовхів від мікропрофілю дороги через демпфуючі та пружні елементи підвісок та шин. У моделі також враховано пробої підвісок, залежності корозії від умов експлуатації, завантаження пасажирями та швидкості руху автобуса.

Розроблену модель було перевірено на адекватність співставленням із результатами, що були отримані при експлуатації автобусів на реальних маршрутах. Відповідно розроблена модель задовільно описує процеси впливу на ресурс кузовів автобусів несівної конструкції та на рамному шасі і дозволяє визначати ресурс кузова автобуса при умовах експлуатації, що відповідають реальним маршрутам при перевезенні пасажирів.

Проведено моделювання параметрів довговічності автобуса в обраних умовах і встановлено, що на ресурс кузова автобуса суттєво впливають пробої

підвісок автобуса, при справній підвісці та при русі по дорогах низької якості та постійних перевантаженнях. Мінімальний пробіг до руйнування лонжеронів каркасу основи кузова автобуса склав 57523 км при півторакратному перевантаженні пасажирами та русі автобуса по бруківці низької якості. Максимальний пробіг до руйнування лонжеронів каркасу основи кузова автобуса склав 1289315 км при перевезенні тільки пасажирів, що сидять, та русі автобуса по дорозі високої якості з асфальтобетонним покриттям.

Проведено оцінку довговічності кузова автобуса на рамному шасі використанням імітаційного комп'ютерного моделювання, яка лежить у межах від 5 до 11 років залежно від умов експлуатації. При дослідженні враховано такі фактори: завантаження пасажирами, мікропрофіль дороги, швидкість руху автобуса, корозія. Встановлено, що рама має у 1,5–1,8 рази більшу довговічність, ніж сам каркас кузова. Проведені результати дослідження вказують на першочергове поліпшення антикорозійного захисту каркасу кузова, щоб наблизити його ресурс до ресурсу рами.

Для дослідження напружень в елементах каркасу кузова було розроблено, виготовлено та відкалібровано заводостійку автономну тензометричну станцію із використанням тензометра Гугенбергера. Перевірку працездатності тензометричної станції проведено в лабораторних умовах із використанням тензометра Гугенбергера на зразках труб каркасу кузова автобуса «Атаман», взятих з програми виробництва на АТ «Черкаський автобус», що підтвердило можливість достовірно визначати напруження в елементах каркасу кузова при перевезенні пасажирів на реальних маршрутах.

Проведено дорожні випробування автобуса та визначено напруження в досліджуваному перерізі автобуса при різних режимах руху, що дозволило порівнювати з результатами імітаційного моделювання та отримувати граничні значення напружень для уточнення моделей та адекватних розрахунків каркасу кузова на рівномірність.

Проведено дослідження фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса з восьмирічним терміном експлуатації. В результаті

досліджень встановлено, що у зразків без помітних зовнішніх ушкоджень було визначено суттєве погіршення фізико-механічних властивостей. Отримані дані характеристик елементів каркасу кузова дозволили вдосконалити методику моделювання-розрахунку напружено-деформованого стану кузова на базі методу скінченних елементів з урахуванням впливу корозії і втомної міцності металу каркасу та оцінки відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки.

Проведено перевірку кузова восьмирічного автобуса на відповідність умовам пасивної безпеки згідно до вимог Правил ЄЕК ООН № 66 методами імітаційного моделювання та встановлено, що деформація стійок перевищує допустиме значення в 2,21–3,81 рази, що вказує на неприпустимість його подальшої експлуатації.

Запропоновано три можливих варіанти вдосконалення технологій виготовлення кузовів автобусів в аспекті корозії і довговічності, із використанням сучасних прогресивних матеріалів та клеючих сумішей. Проведено випробування клеючих сумішей із поверхнями приклеювання щодо їх адгезійних властивостей, що дозволило подальше впровадження у виробництво, з умови надійності та довговічності в процесі старіння.

Враховуючи напружені графіки руху автобусів громадського транспорту, розроблено рекомендації щодо підвищення довговічності кузова автобуса в процесі експлуатації.

Розроблено теоретичні основи формування раціонального терміну експлуатації з умов мінімізації загальних витрат. Це дозволило здійснювати оцінку необхідних програм оновлення парку автобусів громадського транспорту на основі чого проводиться державне регулювання оновлення парку з умов безпеки руху і екології.

Наукова новизна отриманих результатів.

У результаті виконання дисертаційної роботи отримані такі основні наукові результати:

уперше:

– запропоновано метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з урахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та забезпечити пасивну безпеку пасажирських перевезень;

– запропоновано методика оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації та відповідні пропозиції доповнення-зміни до ДСТУ 3649: 2010 (аналогічно до загальноєвропейської практики);

– опрацьовано практичні рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу;

– дана кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова та, відповідно, безпечний ресурс до вимог нормативної бази (Правил ЄЕК ООН № 66);

набули подальшого розвитку:

– методика моделювання-розрахунку напружено-деформованого стану кузова на базі методу скінченних елементів з урахуванням впливу корозії і втомної міцності металу каркасу та оцінка відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки.

Практичне значення одержаних результатів досліджень складають:

– методика прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з урахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та забезпечити безпеку пасажирських перевезень;

– рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу;

– кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова та, відповідно, безпечний ресурс відповідно до вимог Правил ЄЕК ООН № 66;

– методика оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації та відповідні пропозиції доповнення-зміни до ДСТУ 3649: 2010;

– методика моделювання-розрахунку напружено-деформованого стану кузова на базі методу скінченних елементів з урахуванням впливу корозії і втомної міцності металу каркасу та оцінка відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки;

– рекомендації по підвищенню довговічності кузовів автобусів під час експлуатації;

– технологія оновлення антикорозійного захисту кузовів автобусів з використанням сучасних прогресивних методів та засобів обробки.

Практична значимість отриманих результатів дисертації підтверджується їх використанням при виконанні наукової держбюджетної тематики кафедри автомобілів і тракторів Львівського національного університету природокористування «Розробка інноваційно-інформаційних, проектно-керованих, ресурсощадних систем, технологій і технічних засобів для агропромислового виробництва та його енергозабезпечення», № держреєстрації 0121U109289, від 04.03.2021 та тематики дослідно-конструкторських робіт та виробничої програми ВАТ «Українського інституту автобусо-тролейбусобудування» (м. Львів). Результати дисертаційної роботи прийняті до використання у ВАТ «Український інститут автобусо-тролейбусобудування», АТ «Черкаський автобус», ПрАТ «Ісузу-Атаман Україна», ТОВ «Пересувна механізована колона № 92».

Матеріали роботи застосовуються у навчальному процесі Львівського національного університету природокористування при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальностями 274 – Автомобільний транспорт при викладанні дисциплін: «Автомобілі», «Технічна, комп'ютерна та дистанційна діагностика автомобілів», «Випробування автомобілів», «Надійність машин і систем».

Ключові слова: автобус, кузов автобуса, довговічність, оцінка ресурсу, імітаційне моделювання, формування ресурсу, антикорозійний захист, пасивна безпека, нові технології.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Sosyk, A., Shcherbyna, A., Dudarenko, O., Artyukh, A. (2021). Forecasting the durability of public transport bus bodies depending on operating conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 26–33. Scopus.
2. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Burmistrov, S., Khotunov, V., Metelap, V. (2022). Development of bus body technologies in terms of corrosion and durability. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (117)), 67–75. Scopus.
3. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Hrubel, M., Duzhyi, R., & Babaryha, A. (2022). Development of technological principles of technical control of bus bodies during operation based on passive safety conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (120)), 91–100. Scopus.
4. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Metelap, V., Khotunov, V., Mykhaylyuta, S. (2023). Devising an approach to assessing the durability of bus body on a frame chassis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (122)), 32–39. Scopus.
5. Verbitsky V., Shcherbyna A., Artyukh O., Dudarenko O., Kuzmin V., Ruban D., Fasoliak A. (2023). Mathematical modeling of change of the steering wheel toe-in angles when the vehicle moves in a curved direction. *International*

Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE), Issue 57, Volume 15, Number 4, 344–350. Scopus.

6. Комплексний підхід до вирішення питання щодо інтеграції громадського транспорту та міського планування / Огій О. В., Рубан Д. П., Голубов О. С., Підгорний М. В. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. Харків, 2015. № 5/3(25). С. 51–54.

7. Рубан Д. П., Підгорний М. В., Рубан Г. Я. Застосування електронних систем обстеження пасажиропотоків на міських автобусних маршрутах. *Вестник ХНАДУ*. Харьков, 2016. № 74. С. 17–20.

8. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Структура парку автобусів громадського транспорту України та аналіз ситуації. *Наукові нотатки : міжвуз. зб.* Луцьк, 2016. № 55. С. 338–340.

9. Пилипенко О. М., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Обґрунтування раціональної експлуатації та оновлення автобусного парку м. Черкаси. *Вісник ЧДТУ : зб. наук. пр. у галузі техн. наук.* Черкаси, 2016. № 1. С. 35–40.

10. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Аналіз досліджень з визначення термінів експлуатації автобусів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2016. № 5(128). С. 105–109.

11. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Оцінка зміни фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса в процесі експлуатації. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2017. № 1(5). С. 47–52.

12. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Витрати у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*. Львів, 2017. № 866. С. 162–165.

13. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Дослідження зміни структури матеріалу лонжеронів каркасу кузова автобуса в умовах експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті : наук. журн.* Луцьк, 2017. № 2(9). С. 139–143.

14. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Методологія прогностичної оцінки ресурсної довговічності автобусів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті* : Науковий журнал. Луцьк, 2018. № 2(11). С. 117–121.

15. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова на ресурсні характеристики автобуса в експлуатації. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2018. № 43. С. 31–35.

16. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Вдосконалення системи технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. Харків, 2019. № 15. С. 94–99.

17. Рубан Д. П. Вимірювальний комплекс деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. Харків, 2020. № 17. С. 27–32.

18. Рубан Д. П. Математична модель прогнозування довговічності кузовів автобусів та перевірка її на адекватність. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2020. № 3(150). С. 81–89.

19. Рубан Д. П. Дослідження зміни напружень в елементах каркасу кузова автобуса під час експлуатації. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2020. № 46. С. 27–32.

20. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Прогнозування довговічності лонжеронів каркасу основи автобуса в проблемних місцях. *Технічна інженерія : наук. журн.* Житомир, 2020. № 2(86). С. 18–23.

21. Технологічні засади забезпечення довговічності кузовів автобусів у процесі виробництва. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Крайник Ю. Л., Дзьоба В. В. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2020. № 2(12). С. 106–111.

22. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Грищук О. К. Умови та заходи по підвищенню довговічності кузовів автобусів громадського транспорту під час експлуатації. *Вісник Національного транспортного університету*.

Сер. Технічні науки. Науково-технічний збірник. Київ, 2021. № 1 (48). С. 293–301.

23. Ruban, D.P., Kraynyk, L.V. (2017). Estimation of the regulated term of exploitation of busses from terms of accordance to norms of passive safety as a result of corrosion and tireless durability of basket. *Systemy I Środki transportu samochodowego. Ser.: Transport – Rzeszów*, Mon. Nr. 10, pp. 95–100.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Аналіз тенденцій розвитку пасажирських автобусних перевезень України та країн СНД. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : тези доп.: матеріали 2-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції. Львів, 2016. С. 105–108.

25. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Існуючі дослідження по визначенню термінів експлуатації автобусів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця, 2016. С. 88–92.

26. Рубан Д. П., Рубан Г. Я., Підгорний М. В. Застосування електронних систем обстеження пасажиропотоків на міських автобусних маршрутах. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів* : збірник наукових праць. Миколаїв, 2016. С. 98–102.

27. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Особливості антикорозійного захисту кузовів автобусів підчас експлуатації. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. та наук.-метод. конф., присвяч. 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з Дня народж. проф. А. Б. Гредескула, 20–21 жовт. 2016 р. Харків, 2016. С. 120–121.

28. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Оцінка фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса залежно від терміну експлуатації. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали V міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця, 2017. С. 60–64.

29. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Витрати у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання* : II Всеукраїнська науково-теоретична конференція, 16–18 берез. 2017 р. : тези доповідей. Львів, 2017. С. 40–42.

30. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Структура комп'ютерного моделювання – оцінювання ресурсу кузова автобуса з умов втомної міцності та корозії. *13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові* : матеріали симпозіуму. Львів, 2017. С. 119–120.

31. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Дослідження зміни структури матеріалу лонжеронів каркасу кузова автобуса в умовах експлуатації. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали X міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2017. С.151–153.

32. Рубан Д. П., Рубан Г. Я., Осадчий В. П. Обґрунтування доцільності оновлення автобусного парку України. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів*: зб. наук. пр. Миколаїв, 2017. С. 49–50.

33. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Причини виникнення несправностей під час гарантійного обслуговування автобусів громадського транспорту *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 жовт. 2017 р. Харків, 2017. С. 130–131.

34. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу корозії автобуса на фізичну міцність несівних елементів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали VI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Вінниця, 2018. С. 157–167.

35. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Пропозиції щодо обов'язкового періодичного технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту. *Автобусобудування та пасажирські*

перевезення в Україні : матеріали 3-ї Всеукр. наук.-практ. конф. Львів, 2018. С. 3–5.

36. Рубан Д. П. Математична модель прогнозування довговічності кузовів автобусів. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів* : збірник наукових праць. Миколаїв ; Коблево, 2018. С. 54–56.

37. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова на ресурсні характеристики автобуса в експлуатації. *Новітні технології розвитку автомобільного транспорту* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., 16–19 жовт. 2018 р. Харків, 2018. С. 66–69.

38. Рубан Д. П., Крайник Ю. Л., Дзьоба В. В. Нові технології у виробництві кузовів автобусів з умов корозії. *Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів* : матеріали Всеукр. наук.-практ. семінару, 22 трав. 2019 р. / Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2019. С. 33–34.

39. Рубан Д. П., Крайник М. В., Рубан Г. Я. Методологія оцінки безпечності експлуатації кузовів автобуса з умов корозії та втомної міцності. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем* : матеріали Всеукр. наук.-техн. інтернет-конф., 28–29 листоп. 2019 р. / Нац. ун-т водного госп.-ва та природокористування. Рівне, 2019. С. 139–140.

40. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Аналіз корозійних пошкоджень кузовів автобусів під час експлуатації. *Тези всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 11–15 трав. 2020 р.* Житомир : Житомир. політехніка, 2020. С. 74.

41. Оцінка пасивної безпеки кузова автобуса під час експлуатації / Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я., Крайник М. В. *Проблеми і перспективи*

розвитку автомобільного транспорту : матеріали ІХ міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. Вінниця, 2021. С. 229–231.

42. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Особливості технічного контролю кузовів автобусів рамної конструкції. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф. Вінниця, 2021. С. 195–197.

43. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка ресурсу кузова автобуса залежно від стану автомобільних доріг. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 90-річчю кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-ту, 27–29 жовт. 2021 р. Харків, 2021. С. 269–272.

44. Державний технічний контроль з урахуванням загальноєвропейської практики вибракування автобусів. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я., Курбака Г. В. *Економіко-правова політика в умовах світової кризи: проблеми і шляхи подолання* : зб. тез доп. учасників міжнар. наук.-практ. конф., Черкаси, 25 листоп. 2021 р. Черкаси : Східноєвроп. ун-т ім. Рауфа Аблязова, 2021. С. 51–53.

45. Рубан Д. П. Експрес оцінка відповідності кузова автобуса вимогам пасивної безпеки в експлуатації. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали Х міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. Вінниця, 2022. С. 256–258.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

46. Курбака Г. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Комплексний підхід при підвищенні екологічної безпеки автомобільного транспорту. *Розвиток наукових міжгалузевих досліджень*. : матеріали наук.-практ. конф., м. Вінниця, 26–27 листоп. 2021 р. Херсон : Молодий вчений, 2021. Ч. 2. С. 84–87.

ABSTRACT

Ruban D. P. Scientific and applied foundations of predictive assessment and formation of the bus body resource. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the doctor's degree of technical sciences in the specialty 05.22.02 "Cars and Tractors". – Lviv National Environmental University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

Relevance of the topic.

The body of the bus, as a determining element of the structure, during operation due to corrosion and fatigue strength undergoes changes and is decisive in terms of legislative, regulated requirements for passive safety (UNECE Rules № 52, 66, 107). These factors are decisive in the practice of the EU countries during conducting mandatory technical controls of public transport buses, but which at least are still absent in the restored regulatory framework of Ukraine (State Standard of Ukraine 3649: 2010) and other post-soviet countries.

Within the framework of Ukraine's accession to the countries participating in the Geneva Agreement of 1958. (Law of Ukraine № 8048-IV of 20.02.2000) design of bus bodies and subsequent assessment (certification tests) are already carried out in accordance with the conditions of compliance with passive safety requirements (the permissible level of body deformation during tipping over to the side – UNECE Rules № 66 and № 107, or static load on the roof – for buses of category M2 of UNECE Rules № 52). However, during operation, due to corrosion and fatigue strength of the metal (under the influence of various characteristics of road irregularities and passenger load/passenger traffic) the physical and mechanical properties of the metal of the body frame as a whole undergo significant changes (in the direction of deterioration), as a result of which after a certain period of operation the body no longer meets the regulatory requirements of passive safety and needs culling or repair. Accordingly, this causes two main directions of research:

- elaboration of methods for ensuring the required level of strength characteristics of body frames in general under the conditions of corrosion and fatigue strength during operation at the stage of design and production of buses;
- elaboration of technical control methods of the body's compliance during operation with regulatory requirements of passive safety (as a condition for admission to further operation in the public transport system).

The relevance of the latter is also due to the conditions of Ukraine's accession to the Hague Convention on Road Traffic and the deployment of a system of mandatory periodic technical control of cars/buses, as a condition for admission to operation for the next limited period of time. The post-soviet legislative framework in this area (State Standard of Ukraine 3649: 2010 and others) does not yet provide for clear technical criteria for quantitative, threshold assessment of significant body characteristics as a condition of conformity and prediction of admission to further operation. Thus, the development of theoretical foundations for calculating the resource of the bus body at the stage of design work under certain operating conditions under the conditions of compliance with the legislative regulatory framework for the passive safety of the structure, as well as the corresponding improvement of production technology is an relevant scientific and applied problem.

In the dissertation work the methodology for assessing the safety of operation of bus bodies under corrosion and fatigue strength conditions is substantiated within which:

- proposed method of predictive calculation of the bus body life during operation taking into account the conditions of movement and the effects of corrosion and fatigue strength [47, 90, 97, 99];
- proposed methodology for assessing the compliance of the body structure with the regulatory requirements of passive safety during regular technical controls during operation and relevant proposals for addition-changes to State Standard of Ukraine 3649: 2010 (similar to the common European practice) [99, 156, 157, 159];
- practical recommendations were developed on the design of bus bodies in the aspect of structural materials and body production technologies in connection with

certain operating conditions and the necessary safe body life, taking into account the corrosion processes and fatigue strength of the frame [125, 131, 138];

- a quantitative assessment of the influence of the type and condition of roads for different classes of buses and the formation of fatigue strength of the body frame was given [88, 90, 91, 99];

- improved the method of modeling-calculation of the stress-strain state of the body on the basis of the finite elements method, taking into account the effects of corrosion and fatigue strength of the metal frame and assessing compliance with regulatory requirements of passive safety [86, 99];

- conducted researches confirming the deterioration of the body frame material during operation, and assessing the adequacy of the simulation results - calculation [54, 100, 106];

- developed recommendations to increase the durability of bus bodies during operation [130];

- the consequences of the introduction of low-entry platforms into the structure of the carrying body and their impact on the resource characteristics of buses are substantiated [8];

- conducted analysis of research on the definition of rational service life of buses and worked out statistical data on costs in relation to the service life of city buses [16, 77];

- applied a systematic approach to the analysis of the structure of the public transport bus fleet and the situation in Ukraine regarding the impact of long operating times on the safety of passenger transportation [55];

- applied a systematic approach to the formation of passenger traffic and the corresponding passenger capacity of buses, which is an integral part of the formation of the resource of buses during operation [55, 59, 60];

- the consequences of untimely adjustment of the angles of installation of the steered wheels of the bus on the durability of its body are substantiated [162].

The most important works in this direction are the researches of foreign and domestic scientists, among which it is worth highlighting the following:

L. V. Kraynyk, O. Z. Gorbay, P. P. Melnychuk, P. A. Akopyan, I. I. Kelman, P. A. Fomichov, K. E. Golenko, V. M. Khrun, V. E. Kanarchuk, V. S. Lukinsky, M. I. Virevkin, N. S. Zainiddinov, D. S. Lvov, Y. A. Zykov, V. I. Grimsky, M. Kepka, M. Kepka Jr., J. Dzugan, P. Konopik, J. Václavík, J. Chvojan, Y. Boutar, B. V. Farahania and others. After analyzing existing researches to determine the durability and rational life of buses, it was found that there are no researches on determining the resource of public transport buses with a carrying body and on a frame chassis, which would simultaneously combine significant factors of influence: the properties of the road surface (microprofile of the road), passenger loading, bus speed and corrosion.

It is known that the bus park of public transport in Ukraine in terms of the average service life of buses is the oldest in Europe and by this indicator exceeds the recommendations of Germany, France, scandinavian countries on the service life on regular passenger routes. A fairly small proportion of buses in Ukraine has a service life of 5–10 years. However, even with such service life, buses may not meet the requirements of UNECE Rules № 66 and № 107, which is explained by the degradation of the material of the body frame elements and is accompanied by a constant increase in operating costs. With a service life from five years, a significant proportion of buses, especially those operated in cities with a population of one million, already need restoration repairs. Such repairs can mainly be carried out without compliance with factory manufacturing technologies and without the use of special equipment, which negatively affects the provision of compliance with UNECE Rules № 66 and № 107.

The work determined the dynamics of operating costs in the function of time, which shows that operating costs begin to increase after two years of operation (with runs from 100 thousand km). Costs increase dramatically with service life of more than eight years. It was established that the main factor causing costs are defects in the bus body. With a service life from five to nine years, the bus needs restoration repairs, because the elements of the body frame are damaged by structural corrosion

and fatigue destruction. Refurbishment of the body lasts about thirty days, which additionally causes damage from downtime (equivalent to 75–170 \$ per day).

Data on the real practice of operating buses according to the existing system of current and restoration repairs of public transport buses are processed. It was established that buses are mainly repaired by motor transport enterprises (this reduces the cost of repairs), or on third-party organizations that carry out restoration repairs of bodies without observing factory technologies and without using special equipment. As a result of such repairs, the durability of the bus can increase only by 2–3 years, which could be implemented at the design stage when developing progressive technical solutions and timely updating of corrosion protection during operation.

During forming critical service life of buses on the basis of data from operating organizations, it was established that the main component limiting the life of the bus is its body, the malfunction of which (breakdowns, cracks, structural corrosion) requires immediate repair. It was also established that buses continue to operate without visual damage, despite the fact that the characteristics of the frame material in the process of degradation no longer provide proper body strength.

During development of methodological principles of restoration repairs of bus bodies, it was proved that the classical methods of carrying out restoration repairs on their own by a motor transport enterprise or similar repair organizations do not allow to ensure proper durability and compliance of the bus body with the requirements for passive safety in accordance with UNECE Rules № 66 due to the lack of methods for controlling elements that do not have visual damage. Therefore, to increase the efficiency of repairs, it is proposed to carry them out in the factory based on the results of properly identifying defects in the use of the latest technologies and modern materials.

The method of assessing the compliance of the body structure with the regulatory requirements of passive safety during regular technical controls during operation allows us to supplement State Standard of Ukraine 3649: 2010 with points that meet the requirements of European practice. This will allow, during regular technical controls, to identify non-compliance with the requirements for UNECE

Rules № 66 using special measuring instruments and diagnostic methods. The developed method of predictive calculation of the bus body life during operation, taking into account the driving conditions and the effects of corrosion and fatigue strength, allows to calculate the life of bus bodies of carrying structure and on the frame chassis. The model was developed to fully take into account the realities of operation. This model describes the transfer of jolts to the bus body from the microprofile of the road through damping and elastic elements of suspensions and tires. The model also takes into account suspension breakdowns, corrosion dependence on operating conditions, passenger loading and bus speed. The developed model was tested for adequacy by comparison with the results obtained during the operation of buses on real routes. Accordingly, the developed model satisfactorily describes the processes of impact on the life of bus bodies of carrying structure and on the frame chassis and allows to determine the bus body life under operating conditions corresponding to real routes during transporting passengers. Simulation of the parameters of durability of the bus in the selected conditions was carried out and it was established that the breakdown of the bus suspension is significantly affected bus body resource, with a serviceable suspension and during driving on low-quality roads and constant overloads. The minimum mileage before the destruction of the bus body frame spars was 57523 km with one and a half times overload by passengers and the movement of the bus on the pavement of poor quality. The maximum mileage to the destruction of the bus body frame spars was 1289315 km during transporting only sitting passengers and the movement of the bus on a high quality road with asphalt pavement.

The durability of the bus body on the frame chassis was assessed using simulation computer modeling, which is in the range from 5 to 11 years, depending on the operating conditions. The research took into account the following factors: passenger occupancy, microprofile of the road, bus speed, corrosion. It was established that the frame has 1.5–1.8 times greater durability than the body frame. The results of the research indicate a primary improvement in the corrosion protection of the body frame in order to bring its resource closer to the frame

resource. To research the stresses in the elements of the body frame, a noise-resistant autonomous strain gauge station using the Gugenberger tensiometer was developed, manufactured and calibrated. The test of the performance of the strain gauge station was carried out in the laboratory using the Gugenberger tensiometer on samples of pipes of "Ataman" bus body frame, taken from the production program at JSC "Cherkasy Bus", which confirmed the ability to reliably determine the stresses in the elements of the body frame during transporting passengers on real routes.

Road tests of the bus were carried out and the tension in the researched section of the bus under different modes of movement was determined, which made it possible to compare with the results of simulation modeling and obtain limiting values of stresses to clarify the models and adequate calculations of the body frame for equal strength. The research of the physical and mechanical properties of the elements of the the bus body frame with an eight-year service life was carried out. As a result of research, it was found that in samples without noticeable external damage, a significant deterioration in physical and mechanical properties was determined. The obtained data on the characteristics of the body frame elements made it possible to improve the method of modeling-calculating the stress-strain state of the body based on the finite elements method, taking into account the effects of corrosion and fatigue strength of the metal frame and assessing compliance with regulatory requirements for passive safety. The body of an eight-year-old bus was checked for compliance with passive safety conditions in accordance with the requirements of UNECE Rules № 66 by simulation methods and it was found that the deformation of the racks exceeds the permissible value by 2.21–3.81 times, which indicates the inadmissibility of its further operation. Three possible options for improving the technology of manufacturing bus bodies in the aspect of corrosion and durability, using modern progressive materials and adhesives are proposed. Adhesive mixtures with gluing surfaces were tested relative to their adhesive properties, which allowed further introduction into production, under the condition of reliability and durability in the aging process.

Taking into account the busy schedules of public transport buses, recommendations were developed to increase the durability of the bus body during operation.

Theoretical foundations for the formation of a rational service life from the conditions of minimizing total costs were developed. This made it possible to assess the necessary programs for updating the park of public transport buses, on the basis of which state regulation of the renewal of the park on traffic safety conditions and ecology is carried out.

Scientific novelty of the results.

As a result of the dissertation work, the following main scientific results were obtained:

- the method of predictive calculation of the bus body life during operation is proposed, taking into account the driving conditions and the effects of corrosion and fatigue strength in compliance with the regulatory requirements of passive safety, which allows at the stage of design and formation of production technologies to implement appropriate structures and ensure passive safety of passenger traffic;

- proposed methodology for assessing the compliance of the body structure with the regulatory requirements of passive safety during regular technical controls during operation and corresponding proposals for addition-changes to State Standard of Ukraine 3649: 2010 (similar to the European practice);

- practical recommendations on the design of bus bodies in the aspect of structural materials and body production technologies in connection with certain operating conditions and the necessary safe body life, taking into account the corrosion processes and fatigue strength of the frame, were worked out;

- a quantitative assessment of the impact of the type and condition of roads for different classes of buses and the formation of fatigue strength of the body frame and, accordingly, a safe resource in accordance with the requirements of the regulatory framework, was given (UNECE Rules № 66 and № 107).

The method of modeling-calculation of the stress-strain state of the body based on the finite element method was further developed, taking into account the effects of

corrosion and fatigue strength of the metal frame and assessing compliance with regulatory requirements for passive safety.

The practical significance of the obtained research results are:

- the method of predictive calculation of the bus body life during operation, taking into account the conditions of movement and the effects of corrosion and fatigue strength in compliance with the regulatory requirements of passive safety, which allows even at the stage of design and formation of production technologies to implement appropriate structures and confirm the safety of passenger traffic;

- recommendations for the design of bus bodies in the aspect of structural materials and body production technologies in connection with certain operating conditions and the necessary safe body resource, taking into account the processes of corrosion and fatigue strength of the frame;

- quantitative assessment of the impact of the type and condition of roads for different classes of buses and the formation of fatigue strength of the body frame and, accordingly, a safe resource in accordance with the requirements of UNECE Rules № 66;

- methodology for assessing the compliance of the body structure with the regulatory requirements of passive safety during regular technical controls during operation and the corresponding proposals for addition-changes to State Standard of Ukraine 3649: 2010;

- method of modeling-calculation of stress-strain state of the body based on the method of finite elements, taking into account the effects of corrosion and fatigue strength of the metal frame and assessing compliance with regulatory requirements of passive safety;

- recommendations for increasing the durability of bus bodies during operation;

- technology of updating anti-corrosion protection of bus bodies using modern progressive methods and means of processing.

The practical significance of the obtained results of the dissertation is confirmed by their use in the implementation of scientific state budget topics of the Department of

Automobiles and Tractors of Lviv National Environmental University "Development of innovation and information, design-managed, resource-saving systems, technologies and technical means for agro-industrial production and its energy supply", № state registration 0121U109289, from 04.03.2021 and topics of research and development works and production program of OJSC "Ukravtobusprom" (Lviv). The results of the dissertation were accepted for use in OJSC "Ukravtobusprom", JSC "Cherkassy Bus", PJSC "Isuzu-Ataman Ukraine", LLC "Mobile Mechanized Column № 92". The materials of the work are used in the educational process of Lviv National Environmental University in the preparation of bachelors and masters in the specialties 274 – Road transport in the teaching of disciplines: "Cars", "Technical, computer and remote diagnostics of cars", "Car testing", "Reliability of machines and systems".

Keywords: bus, bus body, durability, resource assessment, simulation modeling, resource formation, corrosion protection, passive safety, new technologies.

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published.

1. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Sosyk, A., Shcherbyna, A., Dudarenko, O., Artyukh, A. (2021). Forecasting the durability of public transport bus bodies depending on operating conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 26–33. Scopus.

2. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Burmistrov, S., Khotunov, V., Metelap, V. (2022). Development of bus body technologies in terms of corrosion and durability. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (117)), 67–75. Scopus.

3. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Hrubel, M., Duzhyi, R., & Babaryha, A. (2022). Development of technological principles of technical control of bus bodies during operation based on passive safety conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (120)), 91–100. Scopus.

4. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Metelap, V., Khotunov, V., Mykhaylyuta, S. (2023). Devising an approach to assessing the

durability of bus body on a frame chassis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (122)), 32–39. Scopus.

5. Verbitsky V., Shcherbyna A., Artyukh O., Dudarenko O., Kuzmin V., Ruban D., Fasoliak A. (2023). Mathematical modeling of change of the steering wheel toe-in angles when the vehicle moves in a curved direction. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*, Issue 57, Volume 15, Number 4, 344–350. Scopus.

6. Ogiy, O., Ruban, D., Golubow, O., & Pidhornyy, M. (2015). Complex approach to the issue of integration of public transport and urban planning. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(3(25)), 51–54.

7. Ruban, D., Pidhornyy, M. & Ruban, H. (2016). Application of electronic checking systems of the amount of passengers on city bus routes. *Bulletin KNAHU*, 74, 17–20.

8. Ruban, D., Ruban, H. (2016). Structure of bus park of public transport of Ukraine and analysis of situation. *Interuniversity collection "Scientific Notes"*. 55, 338–340.

9. Pilipenko, A. M., Ruban, D. P., Ruban, H. Ya.. (2016). Grounding of rational use and replacement of bus park in Cherkasy city. *Bulletin CSTU. Cherkasy*, 1. 35–40.

10. Ruban, D. P., Ruban, H. Ya. (2016). Analysis of research to determine the service life of buses. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 5 (128). 105–109.

11. Kraynyk, L. V., Ruban, D. P., & Ruban, H. Ya. (2017). Assessment of changes in physical and mechanical powers of elements in the frame of the bus body in the process of operation. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 1(5), 47–52.

12. Kraynyk, L., Ruban, D., Ruban, H. (2017). Expenses in interrelation with lifetime city bus. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Dynamics, strength and design of machines and devices*. 866, 162–165.

13. Ruban, D. P., Kraynyk L. V. (2017). Investigation of changes in the material structure of the spars of the bus body frame under operating conditions. *Modern technologies in mechanical engineering and transport. Scientific journal*. 2 (9), 139–143.

14. Kraynyk, L. V., Ruban, D. P. (2018). Methodology for predictive assessment of the resource efficiency of buses. *Modern technologies in machinery and transport. Science journal*, 2 (11), 117–121.

15. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V. (2018). Estimation of influence of introduction of grounds of subzero entrance of «low-entry» in the structure of bearing basket on resource descriptions of bus in exploitation. *Automotive transport. Kharkiv*. 43. 31–35.

16. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, H. Ya. (2019). Improvement of the system of technical control and admission to operation of public transport buses. *Car and electronics. Modern technologies*. 15, 94–99.

17. Ruban, D. P. (2020). Measuring complex of deformations of the elements of the frame of the bus body in operational conditions. *Car and electronics. Modern technologies*. 17, 27–32.

18. Ruban, D. P. (2020). A mathematical model for predicting the performance of the bodywork in buses and the change in the adequacy. *Visnik of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 3 (150), 81–89.

19. Ruban, D. P. (2020). Preliminary changes to the tension in the elements of the frame of the bus body during operation. *Road transport*, 46, 27–32.

20. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H. (2020). Predicting the durability of the frame spars basics of the bus in problem areas. *Technical Engineering. Zhitomir*, 2 (86). 18–23.

21. Ruban, D., Kraynyk, Yu., Dzijoba, V. (2020). Technological principles of ensuring the durability of bus bodies in the production process. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 2(12), 106–111.

22. Ruban, D., Kraynyk, L., Gryschuk, O. (2021). Conditions and measures to increase the durability of public transport bus bodies during operation. *Bulletin of the National Transport University*, 1(48), 293–301.

23. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V. (2017). Estimation of the regulated term of exploitation of busses from terms of accordance to norms of passive safety as a result of corrosion and tireless durability of basket. *Systemy I Środki transportu samochodowego. Ser.: Transport – Rzeszów*, Mon. Nr. 10, pp. 95–100.

Scientific works that testify to the approbation of the dissertation materials.

24. Kraynyk, L. V., Ruban, D. P., & Ruban, G. Ya. (2016). Analysis of trends in the development of passenger bus transportation in Ukraine and the commonwealth of independent states. Materials of the second All-Ukrainian scientific-practical conference: Bus construction and passenger transportation in Ukraine: abstracts (pp. 105–108). Lviv.

25. Ruban, D. P., & Ruban, G. Ya. (2016). Existing studies to determine the life of buses. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Internet Conference: Modern technologies and prospects for the development of road transport (pp. 88–92). Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University.

26. Ruban, D. P., Ruban, G. Ya. & Pidhornyy, M. V. (2016). Application of electronic systems for surveying passenger traffic on city bus routes. The latest ways to create, operate, repair and service cars: a collection of scientific works. (pp. 98–102). Mykolaiv.

27. Ruban, D. P., Ruban, G. Ya. (2016). Features of corrosion protection of bus bodies during operation. Scientific works of the international scientific-practical and scientific-methodical conference dedicated to the 85th anniversary of the Department of Automobiles and the 100th anniversary of the birth of Professor A.B. Gredescul: "The latest technologies in the automotive industry, transport and training", October 20–21, 2016. (pp. 120–121). Kharkiv.

28. Kraynyk, L. V., Ruban, D. P., Ruban, G. Ya. (2017). Evaluation of the physical and mechanical properties of the elements of the bus body frame depending on the service life. Materials of the V international scientific and practical Internet conference: Modern technologies and prospects for the development of road transport. (pp. 60–64). Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University.

29. Kraynyk, L. V., Ruban, D. P., Ruban, G. Ya. (2017). Costs in relation to the service life of city buses. II All-Ukrainian scientific-theoretical conference "Problems with traffic flows and directions of their solution". March 16–18, 2017: abstracts. (pp. 40–42). Lviv.

30. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V. (2017). The structure of computer modeling – assessment of the life of the bus body according to the conditions of fatigue strength and corrosion. The Thirteenth International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv: Materials of the Symposium. (pp. 119–120). Lviv.

31. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V. (2017). Evaluation of the physical and mechanical properties of the elements of the bus body frame depending on the service life. Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference: Modern technologies and prospects for the development of road transport. (pp. 151–153). Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University.

32. Ruban, D. P., Ruban, G. Ya., Osadchiy, V. P., (2017). Justification of the expediency of updating the bus fleet of Ukraine. The newest ways to create, operate, repair and service cars: a collection of scientific papers. (pp. 49–50). Mykolaiv.

33. Ruban, D. P., Ruban, G. Ya. (2017). Causes of malfunctions during the warranty service of public transport buses. Scientific works of the international scientific-practical conference "Road transport and automotive. The latest technologies and methods of training specialists", October 19–20, 2017. (pp. 130–131). Kharkiv.

34. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya. (2018). Evaluation of the effect of bus corrosion on the physical strength of non-sowing elements. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Internet Conference: Modern technologies and prospects for the development of road transport (pp. 157–167). Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University.

35. Kraynyk, L. V., Ruban, D. P., Ruban, G. Ya. (2018). Proposals for mandatory periodic technical control and admission to operation of public transport buses. Materials of the third All-Ukrainian scientific and practical conference: Bus construction and passenger transportation in Ukraine. (pp. 3–5). Lviv.

36. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya. (2018). Mathematical model for predicting the durability of bus bodies. The newest ways of creation, operation, repair and service of cars: collection of scientific works, September 20-22, 2018. (pp. 54–56). Mykolaiv – Koblevo.

37. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya. (2018). Assessment of the impact of the introduction of low-entry platforms "low-entry" into the structure of the non-sowing body on the resource characteristics of the bus in operation. Scientific works of the international scientific-practical conference "The latest technologies of road transport development", October 16-19, 2018. (pp. 66–69). Kharkiv.

38. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Dzioba, V. V. (2019). New technologies in the production of bus bodies under corrosion conditions. Ensuring the functional stability of cars and tractors. Collection of materials of the all-Ukrainian scientific and practical seminar. Kharkiv National Automobile and Highway University, May 22, 2019. (pp. 33–34). Kharkiv.

39. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya. (2019). Methodology for assessing the safety of operation of bus bodies under conditions of corrosion and fatigue strength. Innovative technologies for the development of mechanical engineering and efficient functioning of transport systems. Abstracts of reports. National University of Water and Environmental Engineering, November 28-29, 2019. (pp. 139–140). Rivne.

40. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya. (2020). Analysis of corrosion damage to bus bodies during operation. All-Ukrainian scientific and practical on-line conference of applicants for higher education and young scientists "Prospects for the development of engineering engineering and transport technologies" (dedicated to the Day of Science), May 11–15, 2020. (p. 74). Zhitomir.

41. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., & Ruban, G. Ya. (2021). Assessment of passive safety of the bus body during operation. Problems and prospects for the development of road transport: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Internet Conference (pp. 229–231). Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University.

42. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya. (2021). Features of technical control of bus bodies of frame structure. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference: "Modern technologies and prospects for the development of road transport". (pp. 195–197). Vinnytsia.

43. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya. (2021). Assessment of the bus body life depending on the condition of the roads. Scientific works of the International scientific-practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Department of Automobiles. A.B. Gredeskula Kharkiv National Automobile and Highway University "The latest technologies in the automotive industry, transport and training", October 27–29, 2021. (pp. 269–272). Kharkiv.

44. Ruban, D. P., Kraynyk, L. V., Ruban, G. Ya., Kurbaka, G. V. (2021). State technical control, taking into account the pan-European practice of culling buses. Economic and legal policy in the conditions of the global crisis: problems and ways to overcome : a collection of abstracts of the participants of the International Scientific and Practical Conference, Cherkasy, November 25, 2021. (pp. 51–53). Cherkasy : Rauf Ablyazov East European University.

45. Ruban, D. P. (2022). Express assessment of the compliance of the bus body with the requirements of passive safety in operation. Proceedings of the X International Scientific and Practical Internet Conference: Modern technologies and prospects for the development of road transport (pp. 256–258). Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University.

Scientific works that additionally reveal the scientific results of the dissertation.

46. Kurbaka, G. V., Ruban, D. P., Ruban, G. Ya., (2021). An integrated approach to improving the environmental safety of road transport. Development of scientific intersectoral research. Materials of the scientific and practical conference (Vinnytsia, November 26–27, 2021). (pp. 84–87). Kherson: Publishing House "Young Scientist".

ЗМІСТ

	Стор.
Перелік умовних скорочень	39
Вступ	40
Розділ 1. Огляд і аналіз існуючих досліджень і ситуації з автобусним парком. Постановка проблеми	49
1.1 Існуючі дослідження по визначенню довговічності та раціональних термінів експлуатації автобусів	49
1.2 Структура парку автобусів громадського транспорту України і аналіз ситуації	68
1.3 Постановка проблеми	73
1.4 Висновки до розділу 1.....	77
Розділ 2. Оцінка експлуатаційних витрат у взаємозв'язку з терміном служби	79
2.1 Динаміка експлуатаційних витрат у функції часу.....	79
2.2 Система поточних та відновлювальних ремонтів.....	92
2.3 Формування критичних термінів служби кузовів та автобусів.....	104
2.4 Висновки до розділу 2.....	121
Розділ 3. Прогностична оцінка довговічності кузовів методами комп'ютерного моделювання	123
3.1 Структура і алгоритм комп'ютерного моделювання розрахунку зміни міцності кузова в експлуатації.....	123
3.1.1 Методологія прогностичної оцінки ресурсної довговічності автобусів.....	123
3.1.2 Передаточні функції від дороги до вертикального переміщення кузова автобуса.....	130
3.1.3 Спектральні густини та кореляційні функції мікропрофілю доріг.....	150
3.1.4 Накопичення осередків втомного руйнування в елементах	

	36
каркасу кузова автобуса під час експлуатації.....	157
3.1.5 Протікання атмосферно-кліматичної корозії.....	164
3.2 Оцінка впливу конструкційних матеріалів і технологій виробництва на експлуатаційну довговічність.....	165
3.2.1 Прогнозування довговічності лонжеронів каркасу основи автобуса експрес-методом у проблемних місцях.....	165
3.2.2 Прогнозування довговічності кузова автобуса в процесі експлуатації із урахуванням конструкційних матеріалів і технологій виробництва.....	173
3.3 Визначення граничних термінів експлуатації з умов пасивної безпеки.....	188
3.3.1 Матеріали та методи досліджень.....	189
3.3.2 Результати імітаційного моделювання відповідності кузова автобуса умовам пасивної безпеки.....	194
3.4 Висновки до розділу 3.....	197
Розділ 4. Натурні дослідження оцінки довговічності та надійності автобусів у реальній експлуатації	200
4.1 Визначення зміни характеристик міцності труб каркасу у процесі експлуатації.....	200
4.1.1 Матеріали та методи досліджень.....	200
4.1.2 Результати випробування елементів труб каркасу кузова автобуса у процесі експлуатації.....	203
4.1.3 Дослідження структури матеріалу елементів каркасу кузова, які не мають зовнішніх ознак руйнування.....	206
4.2 Оцінка критичного стану каркасу кузова з умов пасивної безпеки і міцності.....	211
4.2.1 Підготовка обладнання для дорожніх випробувань автобуса....	211
4.3 Методичні засади відновлювальних ремонтів.....	233
4.3.1 Існуючі відновлювальні ремонти силами автотранспортних підприємств.....	233

4.3.2	Відновлювальні ремонти кузовів автобусів на рівні не нижче заводських технологій виготовлення.....	236
4.4	Висновки до розділу 4.....	242
Розділ 5. Методичні основи забезпечення раціональної довговічності кузовів автобусів.....		245
5.1	Рівноміцність і довговічність кузова при проектуванні.....	245
5.2	Технологічні засади забезпечення довговічності кузовів у процесі виробництва.....	261
5.2.1.	Концептуальні рішення по вдосконаленню технології кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності.....	268
5.2.2.	Результати випробування клеючих сумішей із поверхнями приклеювання щодо їх адгезійних властивостей.....	281
5.3	Антикорозійний захист кузова під час експлуатації.....	287
5.3.1.	Вплив експлуатаційних та атмосферних факторів на протікання корозії.....	287
5.3.2.	Захист кузова від корозії.....	289
5.4	Висновки до розділу 5.....	295
Розділ 6. Формування раціональних термінів експлуатації (довговічності) автобусів громадського транспорту в умовах України		298
6.1	Теоретичні основи формування раціонального терміну експлуатації з умов мінімізації загальних витрат.....	298
6.2	Оцінка необхідних програм оновлення парку автобусів громадського транспорту.....	300
6.3	Державне регулювання оновлення парку з умов безпеки руху і екології.....	308
6.3.1	Обґрунтування доцільності оновлення автобусного парку з умов безпеки руху і екології.....	308
6.3.2	Пропозиції щодо вдосконалення технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту.....	312
6.4	Висновки до розділу 6.....	317

	38
Висновки	319
Список використаних джерел	321
Додатки.....	341

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЗ – антикорозійний захист;
АТП – автотранспортне підприємство;
ВК – великий клас;
ВР – відновлювальний ремонт;
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
ЕП – етап проектування;
ЄС – Євросоюз;
ІМ – імітаційне моделювання;
КК – каркас кузова;
МК – малий клас;
МКЕ – метод кінцевих елементів;
ОВК – особливо великий клас;
ОМК – особливо малий клас;
ПБ – пасивна безпека;
ПК – персональний комп'ютер
ПРКА – прогнозування ресурсу кузова автобуса;
РКА – ресурс кузова автобуса;
СК – середній клас.

ВСТУП

Актуальність теми. Кузов автобуса, як визначальний елемент конструкції, в процесі експлуатації внаслідок корозії та втомної міцності зазнає змін та є визначальним з точки зору законодавчих, регламентованих вимог щодо пасивної безпеки (Правил ЄЕК ООН № 52, 66, 107). Дані чинники є вирішальними у практиці країн ЄС при проведенні ресурсних обов'язкових технічних контролів автобусів громадського транспорту, що принаймні поки ще є відсутніми у відновленій нормативній базі України (ДСТУ 3649: 2010) і інших пострадянських країнах.

У рамках приєднання України до країн-учасниць Женевської угоди 1958 р. (Закон України № 8048-IV від 20.02.2000 р.) проектування кузовів автобусів і наступна оцінка (сертифікаційні випробування) вже здійснюються з умов відповідності вимогам пасивної безпеки (допустимий рівень деформації кузова при перекиданні на бік – правила ЄЕК ООН № 66 чи статичному навантаженні на дах – для автобусів категорії M2 Правил ЄЕК ООН № 52). Однак у процесі експлуатації внаслідок корозії і втомної міцності металу (під впливом різних характеристик нерівностей дороги та пасажиронавантаженості / пасажиропотоку) фізико-механічні властивості металу каркасу кузова в цілому зазнають значних змін (у сторону погіршення), внаслідок чого через певний термін експлуатації кузов уже не відповідає нормативним вимогам пасивної безпеки і потребує вибракування чи відновлювального ремонту.

Відповідно це обумовлює два основні напрямки досліджень:

- опрацювання методів забезпечення необхідного рівня характеристик міцності каркасів кузовів в цілому з умов впливу корозії і втомної міцності під час експлуатації ще на стадії проектування і виробництва автобусів;
- опрацювання методами технічного контролю відповідності кузова під час експлуатації нормативним вимогам пасивної безпеки (як умови допуску до подальшої експлуатації у системі громадського транспорту).

Актуальність останнього обумовлена і умовами приєднання України до Гаазької конвенції про дорожній рух та розгортанням системи обов'язкового

періодичного технічного контролю автомобілів/автобусів, як умови допуску до експлуатації на наступний лімітований період часу. Пострадянська законодавча база у цій сфері (ДСТУ 3649:2010 і інші) поки що не передбачає чітких технічних критеріїв кількісної порогової оцінки значимих характеристик кузова, як умови відповідності та прогнозування допуску до подальшої експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з виконанням відповідно до наукової держбюджетної тематики кафедри автомобілів і тракторів Львівського національного університету природокористування «Розробка інноваційно-інформаційних, проектно-керованих, ресурсощадних систем, технологій і технічних засобів для агропромислового виробництва та його енергозабезпечення», № держреєстрації 0121U109289, від 04.03.2021 р. та тематики дослідно-конструкторських робіт та виробничої програми ВАТ «Укравтобуспром» (м. Львів).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка теоретичних основ розрахунку ресурсу кузова автобуса на етапі проектних робіт під певні умови експлуатації з умов відповідності законодавчій нормативній базі щодо пасивної безпеки конструкції, а також відповідного вдосконалення технології виробництва.

Для досягнення вказаної мети в роботі вирішуються наступні **завдання**:

- узагальнення і систематизація умов експлуатації і навантажень кузовів автобусів упродовж 5–15 років;
- вдосконалення та розробка методів оцінки впливу корозії металу насамперед несівних елементів каркасу кузова на зміну фізико-механічних характеристик труб і з'єднань каркасу;
- узагальнення та розробка методів оцінки впливу ефекту втомної міцності елементів каркасу впродовж експлуатації на міцність і пасивну безпеку металоконструкції кузова автобуса;
- вдосконалення та розвиток методів оцінки та впливу корозії та втомної міцності каркасу на пасивну безпеку кузовів автобусів та оцінки критичного

порогового рівня погіршення фізико-механічних характеристик металопрокату каркасу з умов відповідності законодавчій нормативній базі (Правил ЄЕК ООН № 66, № 107);

– розробка програмного комплексу для імітаційного моделювання-розрахунку зміни міцності каркасу кузова автобуса залежно від пробігу і часу експлуатації під різні типові умови – сфери використання автобусів;

– розробка програмного комплексу для прогностичної оцінки впливу використання тих чи інших сортamentів прокату і марок сталі на зміну допустимого ресурсу кузова з умов дотримання відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки;

– розробка практичних рекомендацій по конструктивному синтезу і технології виробництва кузовів автобусів під конкретні умови і сфери експлуатації з умов забезпечення певної довговічності – термінів експлуатації та відповідність вимогам пасивної безпеки;

– розробка рекомендації щодо оновлення ДСТУ 3649: 2010 шляхом введення загальноєвропейської практики вибракування автобусів при недопустимому погіршенні міцності каркасу внаслідок корозії та втомної міцності.

Об'єктом дослідження є процеси та допустимі межі старіння кузовів автобусів під час експлуатації та формування відповідності рекомендацій для проектних робіт з кузовобудування згідно умов регламентованого ресурсу кузова.

Предметом дослідження є удосконалення методів проектування та технології виробництва кузовів автобусів згідно умов збільшення ресурсу та довговічності при дотриманні регламентованої пасивної безпеки конструкції.

Методи дослідження. Використано методи математичного та комп'ютерного моделювання, у тому числі при прогностичній оцінці ресурсу кузова згідно умов відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки у програмному середовищі Matlab Simulink для різних типових сфер експлуатації автобусів, методи статистичного аналізу, спектральної теорії підресорювання

колісних машин. У процесі теоретичних досліджень прогностичного ресурсу використано метод скінченних елементів для оцінки відповідності кузова допустимим деформаціям при перекиданні (ЄЕК ООН № 66).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що *вперше*:

– запропоновано метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з урахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та підтвердити безпеку пасажирських перевезень;

– запропоновано методика оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації та відповідні пропозиції доповнення-зміни до ДСТУ 3649: 2010 (аналогічно до загальноєвропейської практики);

– опрацьовано практичні рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з урахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу;

– дана кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова та, відповідно, безпечний ресурс відповідно до вимог нормативної бази (Правил ЄЕК ООН № 66);

набула подальшого розвитку:

– методика моделювання-розрахунку напружено-деформованого стану кузова на базі методу скінченних елементів з урахуванням впливу корозії і втомної міцності металу каркасу та оцінка відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки.

Практичне значення одержаних результатів дисертаційного дослідження складають:

– метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з урахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та підтвердити безпеку пасажирських перевезень;

– рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу;

– кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова та, відповідно, безпечний ресурс відповідно до вимог Правил ЄЕК ООН № 66;

– методика оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації та відповідні пропозиції доповнення-зміни до ДСТУ 3649: 2010;

– методика моделювання-розрахунку напружено-деформованого стану кузова на базі методу скінченних елементів з урахуванням впливу корозії і втомної міцності металу каркасу та оцінка відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки;

– рекомендації по підвищенню довговічності кузовів автобусів під час експлуатації;

– технологія оновлення антикорозійного захисту кузовів автобусів з використанням сучасних прогресивних методів та засобів обробки.

Робота має теоретичне та практичне значення, оскільки результати теоретичних досліджень доповнюють теоретичні засади проектування кузовів автобусів та здобули відповідну практичну реалізацію у процесі проектних робіт у АТ «Черкаський автобус» та ВАТ «Укравтобуспром».

Практична значимість отриманих результатів дисертації підтверджується їх використанням при виконанні наукової держбюджетної тематики кафедри автомобілів і тракторів Львівського національного університету

природокористування «Розробка інноваційно-інформаційних, проєктно-керованих, ресурсощадних систем, технологій і технічних засобів для агропромислового виробництва та його енергозабезпечення», № держреєстрації 0121U109289, від 04.03.2021 р. та тематики дослідно-конструкторських робіт та виробничої програми ВАТ «Укравтобуспром» (м. Львів).

Результати дисертаційної роботи прийняті до використання в ВАТ «Український інститут автобусо-тролейбусобудування», АТ «Черкаський автобус», ПрАТ «ІСУЗУ-АТАМАН УКРАЇНА», ТОВ «Пересувна механізована колона № 92». Матеріали роботи використовуються в навчальному процесі Львівського національного університету природокористування при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальностями 274 – Автомобільний транспорт при викладанні дисциплін: «Автомобілі», «Технічна, комп'ютерна та дистанційна діагностика автомобілів», «Випробування автомобілів», «Надійність машин і систем».

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані автором особисто та викладено в роботах [89, 102, 108, 113]. Особистий внесок дисертанта в колективних публікаціях полягає в такому: запропоновано метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з урахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності [47, 88, 90, 97], запропоновано методику оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації та відповідні пропозиції доповнення-зміни до ДСТУ 3649: 2010 (аналогічно до загальноєвропейської практики) [99, 152, 156], опрацьовано практичні рекомендації щодо проєктування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу [125, 131, 138], дана кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних

класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова [66, 88, 90, 99], вдосконалено методику моделювання-розрахунку напружено-деформованого стану кузова на базі методу скінченних елементів з урахуванням впливу корозії і втомної міцності металу каркасу та оцінка відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки [86, 99], проведено дослідження, які підтверджують погіршення матеріалу каркасу кузова в процесі експлуатації [54, 100, 106], розроблено рекомендації по підвищенню довговічності кузовів автобусів під час експлуатації [130], обґрунтовано наслідки введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова та їх вплив на ресурсні характеристики автобусів [8, 79], проведено аналіз досліджень із визначення термінів експлуатації автобусів та опрацьовано статистичні дані по витратах у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів [16, 77], застосовано системний підхід щодо аналізу структури парку автобусів громадського транспорту та ситуації в Україні щодо впливу тривалих термінів експлуатації на безпечність перевезення пасажирів [55], застосовано системний підхід щодо формування пасажиропотоків із метою перевезення пасажирів у межах допустимої пасажиромісткості автобусів, що є невід'ємною складовою формування ресурсу автобусів у процесі експлуатації [55, 58, 59, 60].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на: II, III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (м. Львів 2016, 2018 р.) [68, 159]; IV міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 2016 р.) [53]; X, XIV міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 2017, 2021 рр.) [107, 161]; V, VI міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 2017, 2018 рр.) [83, 104]; IX, X міжнародній науково-технічній Інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»

(м. Вінниця 2021, 2022 рр.) [101, 102]; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів» (м. Миколаїв, 2016, 2017, 2018 рр.) [93, 144, 150]; Міжнародній науково-практичній та науково-методичній конференції присвяченої 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з Дня народження професора А. Б. Гредескула «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців» (м. Харків, 20–21 жовтня 2016 р.) [142]; II всеукраїнській науково-теоретичній конференції «Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв’язання» (м. Львів, 16–18 березня 2017 р.) [78]; 13-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів 2017 р.) [66]; Міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» (м. Харків, 19–20 жовтня 2017 р.) [81]; Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту» (м. Харків, 16–19 жовтня 2018 р.) [79]; Всеукраїнському науково-практичному семінарі «Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів» (м. Харків, 22 травня 2019 р.) [125]; Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем» (м. Рівне 28–29 листопада 2019 р.) [86]; Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки (м. Житомир, 11–15 травня 2020 р.) [84]; Міжнародній науково-практичній конференції присвяченої 90-річчю кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула Харківського національного автомобільно-дорожнього університету «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців» (м. Харків, 27–29 жовтня 2021 р.) [91]; Міжнародній науково-практичній конференції «Економіко-правова політика в умовах світової кризи: проблеми і шляхи подолання» (м. Черкаси, 25 листопада 2021 р.) [157]; Науково-практичній конференції «Розвиток наукових міжгалузевих досліджень» (м. Вінниця, 26–27 листопада 2021 р.) [152].

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи висвітлені у 46 опублікованих наукових працях, у тому числі: 1 монографія (у закордонному виданні), 22 публікації у наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 11 публікацій, що включені до міжнародних наукометричних баз, у тому числі 5 публікацій у виданнях, що індексується у Scopus); 23 тези у збірниках доповідей наукових конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 355 сторінок, 103 рисунки, 25 таблиць, список використаних джерел на 20 сторінках.

Здобувач висловлює подяку провідному вченому в галузі автомобілебудування Крайнику Любомиру Васильовичу, доктору технічних наук, професору, голові правління ВАТ «Український інститут автобусотролейбусобудування», професору кафедри автомобілів і тракторів Національного університету природокористування за консультування та всебічну підтримку під час підготовки дисертації.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І СИТУАЦІЇ З АВТОБУСНИМ ПАРКОМ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

1.1 Існуючі дослідження по визначенню довговічності та раціональних термінів експлуатації автобусів

Відповідно до «Транспортної стратегії України на період до 2020 року» [1] в Україні заплановані поступове оновлення автобусного парку та оптимізація перевезень. Однак перевізники не завжди йдуть на закупівлю нових автобусів, пояснюючи високою вартістю та тривалим терміном окупності (близько 5 років, а то і більше). Крім того термін дії отриманих тендерів на перевезення пасажирів не перевищує 5 років. І як результат автобусний парк практично не оновлюється, відповідно продовжує старіти та автобуси стають об'єктом підвищеної небезпеки як для пасажирів, так і для всього оточення. За даними Міністерства інфраструктури [2] в Україні тільки 44% від загальної кількості автобусів відповідають усім нормам безпеки для перевезення пасажирів, дані якого базуються тільки на візуальних методах контролю.

При перекиданні автобуса згідно Правил ЄЕК ООН № 66 [3] визначається відповідність автобуса до вимог пасивної безпеки (ПБ). Однак на етапі проєктування (ЕП) доцільним буде проведення імітаційного моделювання (ІМ), що значно дешевше руйнування нового автобуса. В роботі [4] показано, що належне технічне обслуговування кузова автобуса забезпечує довготривалу і надійну роботу автобуса в цілому. Однак у даній роботі не вказано, що своєчасне виявлення осередків корозії та втомного руйнування також дозволить підвищити ресурс кузова автобуса (РКА). Через 5–9 років експлуатації автобусів структурна корозія унеможливилює подальшу експлуатацію, тому такі автобуси потребують відновлювальних ремонтів (ВР). У роботі [5] доведено, що збитки від корозійних пошкоджень суттєво зменшують ефективність автобусних перевезень. Тому під час ІМ довговічності кузовів автобусів

потрібно враховувати інтенсивність корозії елементів каркасу кузова. Авторами [6] запропоновано використання нержавіючих сталей у конструкціях автобусів, що може значно підвищити довговічність. Однак використання нержавіючих сталей збільшує вагу автобусів та їх вартість. У роботі [7] проведено визначення втомної міцності поздовжніх балок автомобільних рам під час циклічних навантажень, що є важливим при визначенні довговічності кузова автобуса на рамному шасі.

В роботі [8] підтверджено, що експлуатація автобусів супроводжується постійними перенавантаженнями, що призводять до передчасних пошкоджень елементів каркасу кузова та елементів підвісок, особливо при перевезенні пасажирів у автобусах громадського транспорту типу low-entry. Незважаючи на вище вказані недоліки низькопідлогових конструкцій, автобуси такого типу набули широкого розповсюдження та зручні для перевезення пасажирів громадського транспорту [9, 10]. Тому проблема визначення довговічності кузовів автобусів громадського транспорту актуальна для суттєвої частки перевізників та заводів-виробників. Існує також методологія прогнозування завантаження автобусів пасажирами [11], однак вона не дозволяє визначити довговічність автобусів максимально наближено до реалій експлуатації.

Для боротьби з ожеледицею використовуються соляно-пісчані суміші, в тому числі і високоефективні засоби на основі хлориду магнію, що створюють сприятливі умови для розвитку корозії [12]. Відповідно до такої експлуатації своєчасне регулярне миття автобусів в першу чергу вже зменшує агресивний вплив соляно-пісчаних сумішей на кузов [13]. У роботі [14] описано заходи по зменшенню впливу агресивних середовищ на кузови автомобілів. Ці заходи є актуальними і для автобусів громадського транспорту. В роботі [15] відповідно доведено ефективність захисту від корозії на прикладі шкільних автобусів. Таким чином, ІМ при визначенні довговічності кузовів автобусів дозволить оцінити вплив якості обслуговування на протікання корозії. В роботі [16] показано, що в основному визначається ресурс залізничних вагонів, водного та повітряного транспорту. В роботах [17–21] проводилось моделювання

довговічності без урахування корозії та умов експлуатації. В роботі [22] описано прогнозування довговічності важеля підвіски легкового автомобіля, що може бути також актуальним при прогнозуванні довговічності елементів каркасу кузова автобуса. Однак в цій моделі [22] також не враховане корозійне руйнування досліджуваної деталі. Натурні випробування автобусів на міцність та довговічність проводяться [23–25], однак такий спосіб потребує суттєвих матеріальних витрат.

У роботі [26] проведено аналіз сприйняття комфорту пасажирів автобуса на основі коефіцієнта пасажиропотоку та часу в транспортному засобі. Однак у даній роботі не враховано фактор, що передбачає погіршення властивостей кузова автобуса в процесі експлуатації. Під час технічного контролю кузовів автобусів громадського транспорту актуальним буде використання інтелектуальних транспортних систем, запропонованих авторами [27]. У статті [28] розглядається оцінка динамічного навантаження при генеруванні вібрації від мікропрофілю дорожнього покриття на кузов автомобіля. Запропонований підхід [28] при подальшому розвитку можна використати для прогнозування ресурсу кузова автобуса (ПРКА) та погіршення ПБ у процесі експлуатації. В роботі [29] приділяється особлива увага безпеці руху транспортних засобів у місті при одночасному поєднанні великої кількості чинників та [29] проводиться прогнозування аварійних частот. Такі дослідження можна доповнити й чинниками впливу на ПБ перевезень пасажирів у місті. При вибракуванні автобусів громадського транспорту, що не будуть відповідати вимогам ПБ, важливим буде планування закупівель автобусів аналогічно пропозиціям авторів [30]. Враховуючи те що на автобусах громадського транспорту в основному використовуються пневматичні підвіски, то оптимізація параметрів підвіски дозволить покращити плавність ходу автобуса. Такі методи оптимізації запропоновані авторами [31] шляхом оптимізації роботи пневматичної підвіски електронним куруванням. Така оптимізація [31] призведе до менших вібронавантажень на кузов автобуса та забезпечить його більшу довговічність. Це, в свою чергу, забезпечить більш довготривалу

відповідність автобуса вимогам ПБ [3]. У роботі [32] проведено огляд методів дослідження дорожнього покриття. Такі методи [32] можуть знадобитися при дослідженні впливу дорожнього покриття на РКА. Якість дорожнього покриття (мікропрофіль) безпосередньо впливає на РКА та його відповідність вимогам ПБ [3]. Питання щодо ПБ транспортного засобу можна розглядати і по іншому – запобігати його перекиданню з використанням інтелектуальних систем. Такий підхід запропоновано авторами [33] при русі вантажного автомобіля в місті із застосуванням вмонтованої інтелектуальної системи. Однак ПБ та її постійна відповідність під час всього терміну експлуатації автобуса повинна враховуватись, у першу чергу [34]. Авторами [35] поставлено питання щодо доцільності перевірки відповідності ПБ автобусів громадського транспорту за допомогою чисельних методів замість натурального експерименту. Проведено порівняння результатів натурального експерименту та ІМ. Автори [35] своїми дослідженнями підтвердили право на існування методів з використанням ІМ для перевірки автобусів на їх відповідність Правилам [3]. Однак дане дослідження [35] стосується тільки нових автобусів та не враховує деградацію матеріалу в процесі експлуатації. В роботі [36] ще в 2010 році було представлено науково-прикладні основи формування ПБ і міцності автобусних кузовів на ЕП. У роботі [36] також не розглядалось питання відповідності ПБ автобуса в процесі експлуатації.

В роботах [37, 38, 39] наведено результати досліджень напружень у рамі автомобільного крана та сміттєвоза, що також може бути враховано при визначенні довговічності автобуса на рамному шасі.

В роботі [40] проводиться оцінка довговічності поліуретанових адгезивних з'єднань для алюмінієвого складання конструкцій автобусів. Використання таких матеріалів дозволить підвищити довговічність кузовів автобусів при збільшенні собівартості виготовлення. Тут [40] відсутня інформація по визначенню довговічності автобусів на рамному шасі. В роботі [41] проведено визначення втомного ресурсу конструкції низькопідлогового автобуса при нормальній експлуатації і при прискореному тестуванні. В даній

роботі дослідження автобуса на рамному шасі не проводилось, оскільки низькопідлогові автобуси мають несівну та безрамну конструкцію кузова. У роботі [42] наведено практичні засади для оцінки втомного ресурсу кузовів автобусів і тролейбусів. Також [42] запропоновано проведення лабораторних випробувань зварних елементів лише несівного каркасу кузова. Такий підхід [42] при подальшому розвитку може бути застосований для натурних випробувань рами автобуса на довговічність. В роботі [43] описана методологія прискореного випробування автобусів тільки із несівним кузовом на дорогах із спеціальним покриттям. Дана методологія [43] передбачає виконання ряду натурних експериментів, що є досить витратним. Методологічно робота [43] може підійти і для визначення ресурсу автобуса і на рамному шасі.

Проблема довговічності (ресурсу) кузова автобуса, попри окремі дослідження міцності, ще у часи СРСР проф. Р. А. Акопяна [44, 45], к.т.н. В. М. Хруня [45], к.т.н. І. І. Кельмана [46] та експлуатаційної надійності – к.т.н. В. С. Лукінського та к.т.н. М. І. Верьовкіна [47] практично впродовж останніх 25 років в Україні не досліджувалась. Розвиток комп'ютерних технологій, роботи по моделюванню-розрахунку кузова з умов рівноміцності і ПБ [48] дозволяють на якісно новому рівні сформулювати методики досліджень і прогностичної оцінки довговічності кузова у різних умовах експлуатації.

Як показано в роботі [16] Арінін І. І. запропонував стратегії списання міських автобусів із застосуванням методу динамічного програмування і рівняння Беллмана. В якості критеріїв оптимальності застосовані або прибуток від експлуатації автобусів, або сумарні витрати на їх функціонування.

Методика визначення ресурсу автобусів зарубіжного виробництва, які вже з деяким пробігом почали експлуатацію, запропонована Іголкіним А. М. [16]. В цій роботі визначені фактори впливу на ресурс міських автобусів у конкретних умовах експлуатації. Також розроблений критерій визначення ресурсу міських автобусів та математична модель його цільової функції. Для реалізації методики розроблене інформаційне забезпечення

системи визначення ресурсу міських автобусів. У загальному вигляді значення критерію визначення ресурсу автобусів представлено у вигляді цільової функції

$$P_{y\partial(L)} = D_{y\partial(L)} - C_{y\partial(L)} - H > 0. \quad (1.1)$$

де $P_{y\partial(L)}$ – чистий питомий прибуток отриманий пасажирським АТП за певний час;

$D_{y\partial(L)}$ – дохід від реалізації послуг по перевезенні пасажирів;

$C_{y\partial(L)}$ – питомі поточні експлуатаційні витрати, які в процесі роботи пасажирського автотранспортного підприємства (АТП);

H – питомі витрати, пов'язані із стягуванням податків.

Якунін С. М. [16] розглядає експлуатацію в таксомоторному парку як нових, так і вживаних автомобілів. Для оцінки ефективності експлуатації автомобілів автор використовує техніко-економічні показники – відомий показник витрат q на одиницю транспортної роботи, котрий при виборі автомобіля повинен бути мінімальний та запропонований відносний показник якості автомобіля $\Pi_{оэ}$ експлуатаційної якості автомобіля.

$$q = \{C_n e^{-(a \cdot T_{купівля} + a \cdot L_{купівля})} \cdot [1 - e^{-\Delta T \cdot (a + b \cdot L_{год})}] + Z_{пост.год} \Delta T + \sum_{i=1}^n \frac{Z_{ТОi} L_{год} \Delta T}{L_{ТОi}} + Z_{рем.ава} + N_{пт} L_{год} C_m \Delta T\} / (L_{год} \Delta T) \quad (1.2)$$

де C_n – вартість нового автомобіля;

$T_{купівля}$ – вік автомобіля з початку експлуатації на момент купівлі;

$L_{купівля}$ – пробіг автомобіля з початку експлуатації на момент купівлі;

ΔT – тривалість експлуатації автомобіля у рамках системи «автомобіль-власник»;

$L_{год}$ – середній річний пробіг автомобіля;

$Z_{постзод}$ – постійні річні витрати по допуску автомобілів на дороги загального використання;

$Z_{ТОi}$ – затрати на технічне обслуговування одного автомобіля i -того виду;

N_{pt} – норма витрати пального автомобілем;

$L_{ТОi}$ – періодичність технічного обслуговування i -того виду;

$Z_{рем.ава}$ – затрати на ремонт автомобіля в межах системи «автомобіль-власник»;

$Ц_m$ – вартість пального.

$$П_{оз} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Z_{мор} dt}{(Ц_n - \Delta Ц)} \quad (1.3)$$

де $Z_{мор}$ – витрати на технічне обслуговування та ремонт автомобілів;

t_1 – вік автомобіля, що закупається;

t_2 – вік автомобіля, що продається;

$\Delta Ц$ – зміна вартості автомобіля за час експлуатації.

В роботі [16] показано, що Фадєєвим І. В. особливу увагу звернено на корозійну стійкість автомобільних кузовів. Зазначено, що втрати від корозії кузовів за 6–7 років експлуатації у легкових автомобілях складають 35–40% їх вартості, а від корозії кузовів автобусів і того більше – 60%. При цьому характер зносу 60–70% деталей автомобілів від напрацювання, в тому числі й днища, в загальному випадку визначається рівнянням регресії

$$y = y_n + aL. \quad (1.4)$$

Однак рівняння (1.4) не враховує корозію деталей, тому Фадєєвим І. В. рівняння регресії доповнено рівнянням, що враховує корозійне зношування

$$y_k = a_1 L^b \quad (1.5)$$

де a, a_1, b – коефіцієнти рівняння регресії;

L – пробіг автомобіля.

І як результат із суми рівнянь (1.4) і (1.5) отримано загальне рівняння зношування деталей автомобіля

$$y_{\text{общ}} = y_{\kappa} + aL + a_1L^b. \quad (1.6)$$

Питоме зношування деталей визначається, як перша похідна, залежно від пробігу автомобіля

$$\frac{dy}{dt} = a + a_1bL^{b-1}. \quad (1.7)$$

Експлуатація автобусів, особливо при перевантаженнях пасажирями та при низькій якості вітчизняних доріг, супроводжується значними динамічними навантаженнями, тому слід звернути увагу на роботу Зирянова М. В. [16]. Зиряновим М. В. сказано, що головною причиною виходу із ладу несівних металоконструкцій і шин автомобілів є втомне руйнування. Довговічність цих складових визначається за критерієм втомної міцності, де основними характеристиками є несуча здатність конструкцій, величина навантажень (напружень) і число циклів навантажень. Циклічність роботи характерна також для міських пасажирських перевезень. В якості порівняльного критерію для металоконструкцій використовується величина інтенсивності напружень D , яка пропорційна довговічності та визначається за формулою

$$D = \sum \sigma_i^m N, \quad (1.8)$$

де σ_i – величина i -того напруження;

N – кількість циклів i -того напруження;

m – параметр кривої втомлюваності, що характеризує її кут нахилу.

Кількість циклів і напружень визначались відповідно до методики наведеної в статті [16] методом «дощу» за допомогою спеціально розробленого пакету програмного забезпечення. Крім того в роботі [16] наведено недоліки та сказано Епіфановим С. В. про необхідність у модернізації методу «дощу».

Аналогію по прогнозуванню ресурсу кузовів автобусів можна провести із вагонами транспортерами, наведену Васильєвим А. В., що описана в роботі [16]. Залишковий ресурс базового елемента транспортера T_κ , що підлягає дії корозії визначається із залежності

$$T_\kappa = \frac{S_\phi - S_p}{a}, \quad (1.9)$$

де S_ϕ – фактична мінімальна товщина стінки елемента;

S_p – розрахункова товщина стінки елемента;

a – швидкість рівномірної корозії.

Величина розрахункового терміну експлуатації в роках T_κ по критерію багатоциклічної втомлюваності визначалась із залежності [16]

$$T_\kappa = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m \cdot N_0}{N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m \cdot P_j^I + N_{c2} \sum_k (\sigma_{ak}^{II})^m \cdot P_k^{II} + N_{c3} \sum_n (\sigma_{an}^{III})^m \cdot P_n^{III}}, \quad (1.10)$$

де $\sigma_{a,N}$ – границя міцності за амплітудою для контрольної зони транспортера при симетричному циклі і встановленому режимі навантаження при базовому числі циклів;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втомлюваності;

m – показник ступеню в рівнянні кривої втомлюваності;

N_0 – базове число циклів;

$N_{c1,2,3}$ – число циклів динамічних напружень, що діють на вагон через зчіпний пристрій, від коливань на пружних елементах, експлуатаційних (завантаження-розвантаження) тощо;

$\sigma_{ai(i=j,k,n)}$ – розрахункова величина амплітуди динамічного напруження умовного симетричного циклу, приведена до базового числа циклів, еквівалентна пошкодуючій дії реальному режиму експлуатаційних випадкових напружень за розрахунковий термін експлуатації;

σ_{aj}^I – амплітуди динамічних напружень у j діапазонах ударних повздовжніх сил;

σ_{ak}^{II} – амплітуди динамічних напружень в k діапазонах від коливань на ресорних підвісках;

σ_{an}^{III} – амплітуди динамічних напружень в n діапазонах від циклів завантаження-розвантаження;

$P_{j,k,n}^i$ – виникнення амплітуд при відповідних навантаженнях (де $i=I, II, III$).

Зайниддінов Н. С., методика якого описана в роботі [16], передбачає визначення залишкового ресурсу за критеріями втомного пошкодження і за критеріями втомних навантажень. Реалізація поставлених задач Зайниддіновим Н. С. проводилась із застосуванням математичного моделювання, використовуючи метод кінцевих елементів (МКЕ) для вирішення задач механічно деформованого твердого тіла. Побудова кінцево-елементної моделі та ІМ рами проводилось у програмному пакеті Solid Works.

В роботі [16] показано, яким чином Архиповим В. А. проведено розробку методів прогнозування ресурсу автомобільних агрегатів на етапі їх ремонту із заданою точністю та достовірністю на прикладі задніх мостів. Виявлені складові частини, що характеризують надійність задніх мостів, конструктивно-технологічні фактори, що визначають якість їх ремонту. Експериментально встановлена модель, що характеризує залежність ресурсу заднього моста від можливих факторів впливу. Також слід відзначити, що деякі моделі міських автобусів «Богдан» потерпають передчасним виходом із ладу головних

передач. Тому такі дослідження можуть бути корисними при прогнозуванні ресурсу і задніх мостів автобусів.

Борисов С. В. у своїй роботі аналогічно із Васильєвим А. В. [16], використовуючи також залежності (1.9) і (1.10), проводили прогнозування залишкового ресурсу та продовження термінів експлуатації вагонів метрополітену. При цьому оцінка міцності конструкції проводилась із використанням відомого із технічної літератури рівняння методу скінченних елементів для вирішення задач статички

$$[K]^* \cdot \{q\}^* = \{F\}^*, \quad (1.11)$$

де $[K]^*$, $\{q\}^*$ та $\{F\}^*$ – відповідно глобальна матриця жорсткості, глобальний вектор вузлових переміщень та глобальний вектор зусиль.

На відміну від роботи Васильєва А. В. Борисов С. В. [16] ще використовує критерій крихкого руйнування

$$K_{\sigma 1} \leq [K_{\sigma 1}], \quad (1.12)$$

де $K_{\sigma 1}$ – коефіцієнт інтенсивності напружень;

$[K_{\sigma 1}]$ – допустимий коефіцієнт інтенсивності напружень.

Афанасьєвим А. К. [16] запропонований інженерний метод розрахунку довговічності механізмів до ВР, що також є цікавим для ПРКА. При чому виявлено елементи конструкції, котрі визначають ресурс механізмів до ВР. Цей метод базується на використанні регресійних залежностей, що керують параметрами μ_i та n_i та рангами затрат на відновлення i -того елемента в законі розподілення Ерланга, щільність якого

$$f(t) = \frac{\mu^n}{(n-1)!} t^{n-1} \cdot \exp(-\mu t), \quad (1.13)$$

де n – параметр форми;
 μ – параметр положення.

На основі термодинамічної концепції втомлюваності теоретично і експериментально обґрунтовані та розроблені Аносовим А. П. [16] критерії втомної міцності сталей для розрахункового проектування конструкцій із урахуванням виду напруженого стану, а також створена методика розрахункової оцінки втомної пошкоджуваності вузлів конструкцій та їх ресурсу. Що також може представляти інтерес при ПРКА.

У роботі [16] наведені результати досліджень Баженова Ю. В. по визначенню залишкового ресурсу конструктивних елементів автомобіля. Показано, що на відміну від ЕП, коли прогнозується ресурс усієї сукупності створюваних автомобілів однієї моделі, прогнозування на стадії експлуатації виконується індивідуально для конкретних автотранспортних засобів, їх агрегатів і вузлів. Прогнозування залишкового ресурсу передбачає побудову аналітичних рівнянь, що описують зміну вибраних для оцінки технічного стану об'єкту діагностичних параметрів і обґрунтування їх нормативних значень. Визначення залишкового ресурсу об'єкту здійснюється порівнянням поточних на момент прогнозування значень діагностичних параметрів з їх граничними або допустимими нормативами. Методика застосовується для прогнозування ресурсу циліндропоршневої групи силового агрегату автомобіля, тому вона не дозволяє оцінити ресурс автомобіля вцілому.

Н. В. Поживилов [16] пропонує методику, яка дозволяє визначити оптимальний термін служби автобуса особливо малого класу, який отримується в лізинг, на підприємствах, що займаються регулярними пасажирськими перевезеннями в умовах мегаполісу, з урахуванням впливу сходження з маршруту і простоїв рухомого складу для проходження технічного обслуговування і виконання ремонту на АТП. При цьому враховується фінансова сторона питання, однак ніхто не враховує довговічність кузова та інших складових.

У статті [16] можна ознайомитись з методами визначення оптимальних термінів експлуатації автомобілів та інших машин, що базуються на наукових роботах О. В. Васильєва, Р. М. Петухова, А. І. Селиванова, А. М. Трикова, М. Ф. Фролова, А. С. Гальперина, С. Е. Канторера, Н. С. Сачко, В. В. Новожилова, В. М. Рогожкина та ін. Методи визначення оптимальних термінів експлуатації відрізняються між собою вибором критерію оптимальності і принципами, використаними при рішенні різних завдань. Тут для визначення оптимальних термінів служби застосовують статистичні, аналітичні, графічні, графоаналітичні та інші методи.

Графічний метод був запропонований інженером О. В. Васильєвим [16]. Цей метод дозволяє визначити терміни експлуатації техніки на основі вивчення впливу термінів експлуатації на величину амортизаційних відрахувань, а також на величину витрат на поточний і ВР.

Метод визначення оптимальних термінів експлуатації по матеріальному зносу розробив А. І. Селиванов. Ним запропонована універсальна аналітична залежність між прогресивно зростаючими експлуатаційними витратами і терміном служби [16].

У методі В. В. Новожилова [16], при визначенні термінів експлуатації, не враховуються витрати на відновлення та амортизаційні відрахування. Згідно до цієї концепції пропонується основне рівняння, що визначає оптимальний термін експлуатації. За його допомогою зіставляються витрати виробництва без амортизації на відновлення цієї продукції на старих і найбільш ефективних нових засобах праці

$$C \leq C_H - K_H r, \quad (1.14)$$

де C , C_H – собівартість одиниці продукції без урахування амортизації при перевезенні за допомогою старої та нової техніки;

K_H – капіталовкладення в нову техніку при розрахунку на одиницю готової продукції;

r – норматив ефективності капіталовкладень.

Оптимальний момент заміни старої одиниці техніки на нову настає тоді, коли нерівність (1.14) перетворюється на рівність

$$C = C_H - K_H r, \quad (1.15)$$

При визначенні термінів служби техніки передбачається, що зношена техніка більше не використовується. Зношена техніка по одному призначенню може бути ефективно використана для інших цілей.

Метод визначення терміну служби, запропонований Р. М. Петуховим, описаний у статті [16], полягає в пропозиції встановлювати такі терміни служби машин, при яких задоволення потреб народного господарства за цей плановий період у послугах машин цього призначення забезпечувалося б при мінімальних приведених витратах, що припадають на одиницю виконаної роботи або продукції. З урахуванням визначальних чинників задаються різні терміни служби машин і на основі розрахунків за обумовленим критерієм (мінімум приведених витрат) встановлюються найбільш доцільні терміни на окремих етапах розрахункового періоду. Такий метод може бути використаний при перспективному плануванні для розрахунку виробництва нових машин і потреби в запасних частинах; розрахунках потреби в ВР; розрахунках фактичних поточних витрат і капітальних вкладень за рік; встановленні вікової структури парку автобусів у поточному році планового періоду.

Проблема визначення термінів експлуатації у рамках промислової продукції була розглянута Д. С. Львовим і Ю. А. Зиковим [16]. Будь-яка система, що оптимізується, що моделює економічний процес повинні ґрунтуватися на обліку чотирьох основних чинників: обмеженість ресурсів, чинник часу, стохастичність і невизначеність. Автори стверджують, що для будь-яких варіантів знайдеться такий великий період часу, за межами якого вони для нас непомітні по своїх подальших наслідках, і, отже, вибір одного з

них повинен здійснюватися за цей кінцевий період часу, умовно названий оптимальним терміном планування.

Найширше застосовуються методи Колегаєва Р. М. та Россолова А. І., при якому як критерій оптимальності використовується мінімум собівартості одиниці напрацювання (продукції або роботи) [16]. Суть цього методу полягає в тому, що із збільшенням терміну служби машини питома величина амортизаційних відрахувань, які доводяться на одиницю її напрацювання, зменшується. Приведений метод має недоліки, серед яких головним є необґрунтований вибір мінімуму собівартості одиниці напрацювання в якості критерію оптимальності. Термін служби визначають, враховуючи тільки матеріальне зношування, і його приймають мінімально допустимим. Заміна машини до витікання терміну вимагає капіталовкладень і викликає зростання собівартості одиниці напрацювання. Максимально допустима межа терміну служби устаткування визначається з використанням величини економічного ефекту

$$\Delta E = (C_1 - C_i) \cdot \psi - F_H V(B - 1) - \Delta P_i, \quad (1.16)$$

де ΔE – економічний ефект від підвищення терміну експлуатації машин;

C_1, C_i – відповідно середньорічні сумарні поточні витрати на експлуатацію при мінімально допустимому терміні служби, рівному i років;

ψ – коефіцієнт, що враховує дію чинника часу;

F_H – нормативний коефіцієнт окупності для терміну експлуатації;

V – витрати на придбання виробу;

B – коефіцієнт, що враховує підвищення довговічності виробу;

ΔP – додаткові витрати на ремонт і запасні частини.

Недоліком є те, що не враховується вплив морального зносу на терміни експлуатації. Використовується для визначення термінів експлуатації спеціального і нестандартного устаткування. Метод визначення оптимальних термінів експлуатації Колегаєва Р. М. та Россолова А. І., ґрунтований на

визначенні економічного ефекту від підвищення довговічності машини. За цим методом оптимальний термін служби машини визначається з урахуванням матеріального і морального зносу першої форми. Для цього порівнюються між собою результати розрахунків економічного ефекту від підвищення терміну експлуатації спочатку від одного року до двох років, потім – від одного року до трьох років і т. д.

Показники економічного ефекту відповідного варіанту терміну експлуатації (2, 3, 4, 5... років) порівнюються з показниками базового однорічного терміну експлуатації.

Економічний ефект, що досягається шляхом підвищення терміну експлуатації від одного року до t років ($t = 2, 3, 4...$)

$$\Delta E_t = \frac{\Delta C \Psi}{F_H} - V \cdot (B - 1) - \sum_{i=1}^t \frac{Y_i}{(1 - E_H)^{i-1}}, \quad (1.17)$$

де ΔC – середньорічна економія на поточних витратах у результаті використання менш довговічної техніки;

V – вартість техніки в перший рік її серійного виробництва;

Y_i – витрати на проведення чергового ремонту.

Термін експлуатації, після якого відбувається зниження ефекту, є оптимальним з урахуванням морального зносу першої форми.

Недоліком є те, що не враховується зміна супутніх капітальних вкладень до виробничих фондів ремонтної служби і створення виробничих площ. Розрахунок виконується з умови, що середньорічне напрацювання машини не змінюється з часом, а величина щорічного приросту поточних витрат на експлуатацію машини (ΔC) постійна для будь-якого значення терміну експлуатації.

Для визначення оптимальних термінів експлуатації тракторів використовується математичний апарат динамічного програмування [25]. При розрахунках за цим методом [25] допускається, що в початковий момент часу є

новий трактор, вік якого дорівнює t_0 . Необхідно знайти такий вік $t_1 > t_0$, при якому трактор слід замінити новим, щоб забезпечити мінімум сумарних витрат за t_1 років експлуатації першого трактора і за решту $T_{II} - t_1$ років використання наступних тракторів (T_{II} – прийнята тривалість розрахункового періоду). Недоліком цієї методики є те, що для кожного року в плановому періоді необхідно знати залишкову вартість трактора.

Метод Токарева Т. Г. з визначення оптимального терміну експлуатації автомобілів з урахуванням матеріального зносу відрізняється від розглянутих тим, що в ньому вважається нераціональним використання автомобілів до їх повного зношування [16].

Оптимальним терміном експлуатації по матеріальному зношуванню вважається такий період експлуатації автомобілів, при якому приведені витрати на одиницю продукції мінімальні.

Питома величина приведених витрат визначається за формулою

$$z = \frac{(K - O_p) \cdot (E_H - H_a) \cdot t_1 + C_\Sigma + P_3 + O_p E_H t_2}{B}, \quad (1.18)$$

де K – вартість автомобіля у на момент виготовлення;

C_Σ – витрати на перевезення за весь термін експлуатації (паливне, заробітну плату водіїв);

P_3 – витрати на усі види ремонтів і міжремонтних оглядів за термін експлуатації;

O_p – передбачувана ціна реалізації автомобіля після закінчення терміну експлуатації;

H_a – норма амортизації на реновацію;

t_1 – термін експлуатації автомобіля, для якого проводиться розрахунок витрат;

E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

t_2 – передбачуваний термін експлуатації автомобіля після завершення експлуатації в цій сфері його застосування;

B – загальний об'єм виконаної транспортної роботи на цьому автомобілі за увесь термін експлуатації.

Недолік цього методу полягає в тому, що термін експлуатації автомобіля визначається на основі діючого нормативного терміну експлуатації.

Монгушом С. Ч. в роботі [16] описана методика визначення оптимальних термінів експлуатації при агрегатно-вузловому методі ремонту. Згідно цієї методики оптимальний термін експлуатації буде до настання потреби в ВР кожного окремого агрегату або вузла. Оптимальний термін експлуатації кратний цілому числу періодів між ВР одного з агрегатів або вузлів, що становлять машину. При агрегатно-вузловому методі ремонту визначаються величини питомих приведених витрат для кожного можливого варіанту терміну експлуатації, що співпадає з моментом виникнення потреби в проведенні ВР окремого агрегату або вузла машини. Це призводить до зростання числа можливих варіантів розрахунку оптимального терміну експлуатації.

У роботах [49, 50] запропоновано дистанційне прогнозування технічного стану транспортних засобів, що стає можливим при використанні сучасних засобів моніторингу рухомого складу.

В роботі [51] обґрунтовано визначення довговічності кільцевих зварних з'єднань оболонкових елементів машинобудівних конструкцій, що також може бути враховано при визначенні довговічності зварних з'єднань каркасу кузова автобуса.

В роботі [52] наведено основні положення теорії надійності машин, які є також невідомою частиною життєвого циклу автобусів.

При оцінці ресурсних характеристик автобусів вагомим є досвід, що стосується безвідмовності транспортних засобів. Андриановим Ю. В., про що сказано в роботі [53], запропоновано методику проведення моніторингу безвідмовності транспортних засобів в експлуатації протягом життєвого циклу.

На основі даної методики було отримано залежності основних показників безвідмовності автобусів від пробігу з початку експлуатації (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Залежності основних показників безвідмовності автобусів від пробігу з початку експлуатації [16] у % відносно першого інтервалу пробігу

Показник	Пробіг, тис. км				
	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500
Напрацювання на відмову	100	87	47	38	34
Номенклатура запасних частин	100	189	345	578	820
Витрати на ремонт	100	205	320	456	598
Простої в ремонті і ТО	100	122	176	250	297

Як показують дані в табл. 1.1, ресурсні характеристики із збільшенням пробігу погіршуються. При пробігу в інтервалі 400–500 тис. км приблизно в три рази зменшилось напрацювання на відмову, приблизно в шість разів зросли витрати на ремонт та майже в три рази зросли витрати від простоїв у ремонті та ТО. Отже, при зростанні термінів експлуатації відслідковується динаміка зростання витрат та зменшення надійності автобуса в цілому. Ці дані підтверджують те, що протягом життєвого циклу автобусів постійно збільшуються витрати на експлуатацію, зростає кількість простоїв, погіршуються показники надійності, що, в свою чергу, впливає і на ПБ. Тож з вище сказаного впливає наступне. По-перше, може наступити такий момент, що експлуатація автобуса, враховуючи затрати на ремонт та збитки від простоїв, буде економічно не вигідною. По-друге, у процесі експлуатації при погіршенні фізико-механічних властивостей матеріалу труб каркасу кузова автобуса [54] наступить момент невідповідності щодо дотримання вимог ПБ згідно Правил ЄЕК ООН № 66.

1.2 Структура парку автобусів громадського транспорту України і аналіз ситуації

Відповідно до «Транспортної стратегії України на період до 2020 року» [1] Україна активно включається у світові суспільно-економічні процеси та приєдналася до Світової організації торгівлі, при чому стратегічною метою визнано отримання асоційованого членства у Європейському Союзі. Транспорт, як інфраструктурна галузь, має розвиватися випереджальними темпами з метою сприяння швидкому економічному і соціальному розвитку країни та її участі у міжнародному поділі праці. Сучасне реформування ринку пасажирських перевезень призвело до неоднозначних результатів. З одного боку, у перевізників з'явилася можливість самостійно формувати та пропонувати клієнтам відповідні послуги, планувати заходи і визначати напрямки інвестицій. З другого – у багатьох з них основна частина територіально-технічної бази і транспортних засобів мають значне зношування, на деякі перевезення тарифи регулюються неринковими методами, окремі категорії пасажирів мають право на різноманітні пільги при оплаті проїзду. Незважаючи на це, ринок пасажирських перевезень у нинішніх умовах є перспективним, хоча потрібно пройти ще певні етапи реформування. Крім цього, сьогодні кожний потенційний пасажир самостійно обирає потрібну йому послугу, виходячи зі своїх фінансових можливостей, оцінювання відношення ціни до якості послуги. На сьогодні розв'язання проблем з міськими пасажирськими перевезеннями набуло неабиякої актуальності [55]. До їх розв'язання залучаються відомі наукові школи, зокрема, у містах: Львів, Вінниця, Кременчук [56, 57], м. Черкаси та інших містах України. Усі ці та інші проблеми і задачі щодо вдосконалення транспортного обслуговування населення міст розв'язуються міською владою за підтримки громад, місцевого та державного фінансування. Наприклад у м. Черкаси [58] на замовлення Департаменту житлово-комунального комплексу Черкаської міської ради було проведено науково-дослідну роботу на тему: «Виготовлення науково-технічної продукції щодо дослідження рухомості населення та оптимізації маршрутів

громадського транспорту із деталізацією відповідно до концепції розвитку інфраструктури громадського транспорту м. Черкаси на 2011–2015 рр.». Роботу виконували науковці НУ «Львівська політехніка» кафедри «Транспортні технології» із залученням студентів напряму підготовки 6.070106 – «Автомобільний транспорт» Черкаського державного технологічного університету. При цьому було враховано комплексний підхід до вирішення питання щодо інтеграції громадського транспорту та міського планування [59]. Однак результати науково-дослідної роботи досі не реалізовані. На сьогодні вони можуть бути вже дещо застарілими, адже порівняно з 2012 роком, коли виконувалась науково-дослідна робота, змінилась рухливість населення, нормативна база, тощо. Крім того, більшого розвитку набули автоматизовані системи моніторингу пасажиропотоків [60].

В Україні налічується значна кількість перевізників пасажирів. Автомобільний транспорт при цьому відіграє суттєву роль. Зокрема у внутрішньоміському сполученні провідне місце займають міські автобусні перевезення [61]. У 1990–2014 рр. відсоток міських автобусних перевезень склав 27–52% і є максимальним у порівнянні з іншими видами пасажирського транспорту. Наприклад, у 2014 році метрополітенівським транспортом перевезено 726 млн пасажирів (15%), трамвайним транспортом – 770 млн пасажирів (16%), тролейбусами – 1097 млн пасажирів (23%) та автобусами – 2244 млн пасажирів (46%). Тому технічний стан автобусів та структура автобусного парку України заслуговує особливої уваги.

За статистичними даними [61, 62] з 2000 по 2011 рік кількість автобусів зросла з 140,2 тис. до 175,3 тис. одиниць (рис. 1.1). В тому числі з 2000 по 2011 рік зросла кількість автобусів у особистій власності з 46,1 тис. до 120,7 тис. одиниць.

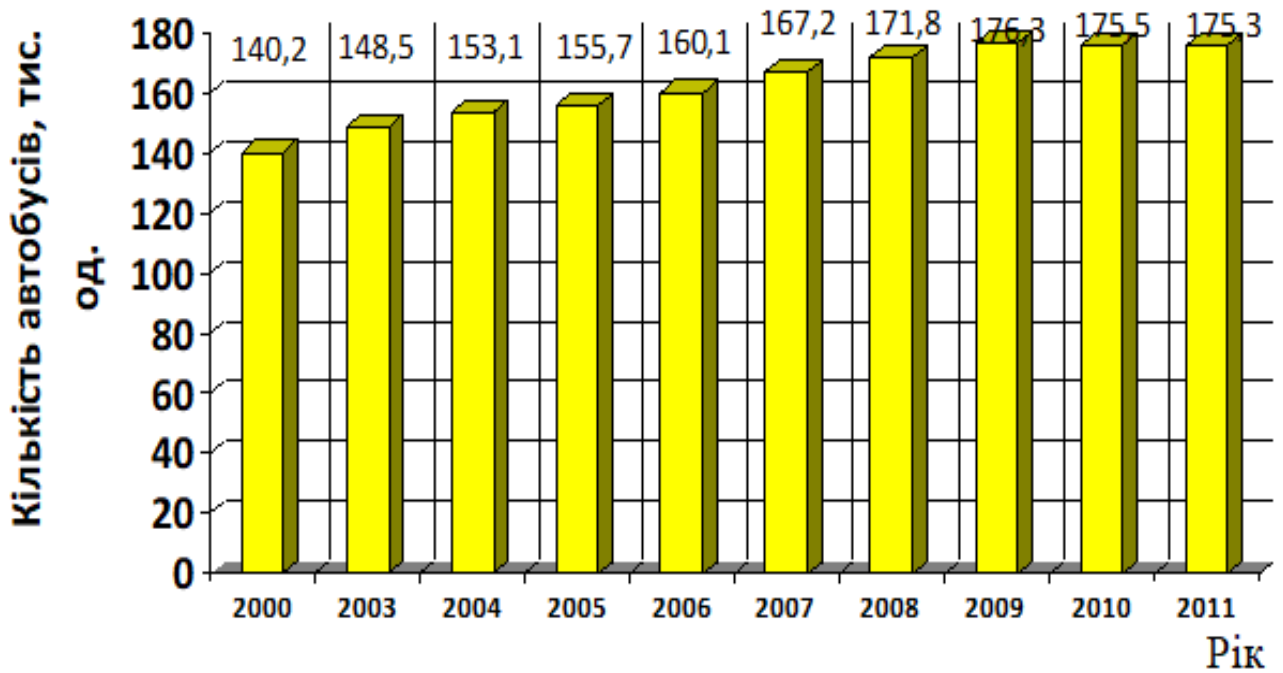


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни кількості автобусів в Україні

Як свідчать офіційні дані [63], більша половина автобусів в Україні потребує оновлення, оскільки лише 44% від загальної кількості автобусів відповідають нормам безпеки для перевезення пасажирів.

За даними 2013 року [63] в Україні проконтрольованих 20300 пасажирських перевізників мають 85,7 тис. одиниць легалізованих автобусів. З них критичного зношування досягли 200 автобусів (рис. 1.2), які експлуатуються більше 34 років, 1200 – від 29 до 33 років, 3600 – від 24 до 29 років, 7900 – від 19 до 24 років. Середнє зношування – 16100 автобусів від 14 до 19 років. Частково відповідають нормам безпеки 19000 автобусів – це автобуси від 8 до 13 років. Повністю відповідають нормам лише 37700 автобусів, термін експлуатації яких до 8 років.

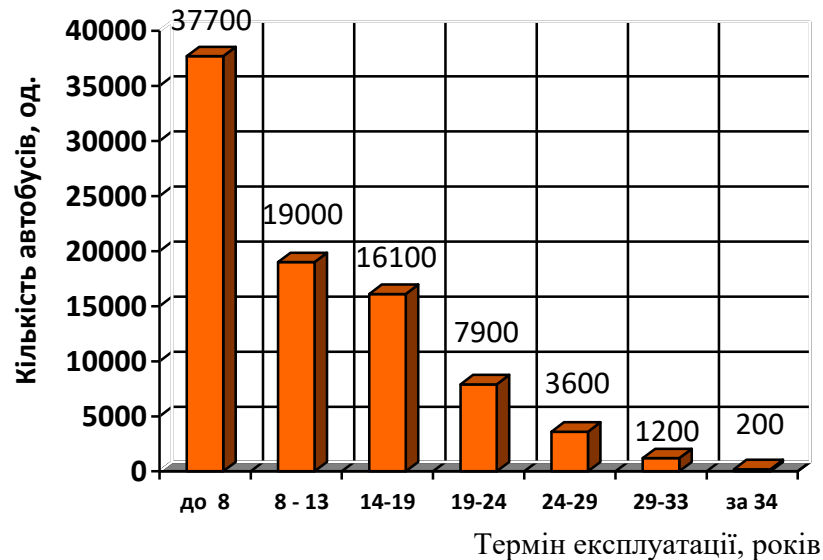


Рисунок 1.2 – Діаграма розподілу кількості автобусів за термінами експлуатації

При цьому, за оцінками експертів [63], кількість автобусів, котрі використовуються для пасажирських перевезень без наявності належних дозвільних документів, може досягати більше 160 тис. Такі «нелегальні» перевізники не забезпечують необхідного рівня комфорту та безпеки, а також все частіше потрапляють у дорожньо-транспортні пригоди від незадовільного стану транспортних засобів та невиконання вимог стосовно умов перевезення пасажирів. Навіть при таких умовах автотранспорт залишається актуальним.

Починаючи з 80-х років структура парку автобусів громадського транспорту України зазнала суттєвих змін [64]. За часів СРСР (рис. 1.3) спостерігається зменшення частки з 26,3% до 18% автобусів малого класу (МК) та середнього класу (СК) з 29,7% до 15%. І навпаки зросла кількість автобусів великого класу (ВК) з 37,7% до 48% та особливо великого класу (ОВК) із 4,3% до 12%. Відповідно за часи СРСР домінуючу частку займали автобуси ВК та СК. Однак, у пострадянський час картина докорінно змінилась. З 1990 року по 2012 рік спостерігається різкий спад кількості як автобусів ВК із 48% до 4%, так і автобусів ОВК із 12% до 0,9%. В той же час постійно зростає кількість

автобусів особливо малого класу (ОМК) та в пострадянський час зростає частка автобусів малого класу (МК). І як результат автобуси ОМК та МК займають домінуюче положення. В 2012 році сумарна кількість автобусів ОМК та МК склала 71%.

Стрімке зростання автобусів малого класу можна пояснити:

– по-перше, наявністю українських заводів, що випускають автобуси МК (ВАТ «Укравтобуспром», АТ «Черкаський автобус», ПАТ «Бориспільський автозавод» і т. д.);

– по-друге, порівняно нижчою вартістю автобусів ОМК та МК за автобуси СК, ВК та ОВК;

– по-третє, в Україні суттєва кількість перевізників (більше 20 тис.) [63] і у порівнянні із країнами ЄС у 20–100 разів більша відповідно до еквівалентних обсягів перевезень [64].

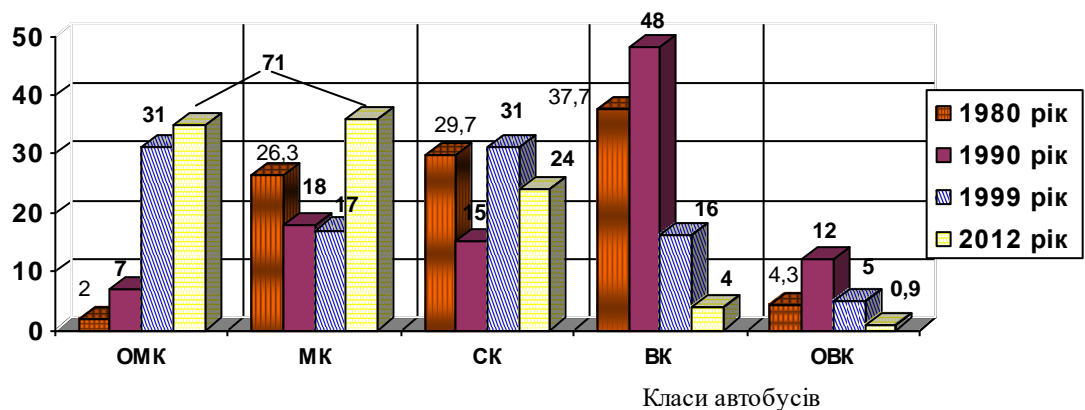


Рисунок 1.3 – Динаміка зміни структури парку автобусів в Україні у відсотках

Однак ефективність роботи автобусів ОМК та МК нижче, ніж автобусів більшої місткості. На це показують порівняння загальної ефективності роботи інфраструктури громадського транспорту, показники якої приведені до еквівалентного обсягу пасажирських перевезень у млн пас.-км. Для автобусів ОМК спостерігається збільшення лінійних витрат палива (у л/100 км) в 2,8–3,2 рази та для автобусів МК існуючого типуажу («Богдан», «Атаман», «Еталон», ЗАЗ) – у 1,7 разів у порівнянні з типовими автобусами ВК (ЛАЗ А183 та

«Богдан» А701). Крім того необхідна кількість автобусів ОМК для забезпечення еквівалентного обсягу перевезень у порівнянні з ВК – орієнтовно більша у 6,0–6,3 рази та автобусів МК – у 2,7 разів. Це спричиняє додаткове завантаження міських вулиць – зайнятість смуги руху при використанні еквівалентного обсягу перевезень кількості мікроавтобусів. ОМК зростає орієнтовно у три рази та для автобусів МК відповідно у 1,6–1,8 разів [64]. У зв'язку з такою ситуацією, для збільшення «ефективності» роботи громадського транспорту перевізниками закупаються 10–15 річні автобуси ВК із країн ЄС. Але це призводить ще до більшого зростання середнього віку автобусів. І на сьогодні тільки 22–24% загальної чисельності автобусів відповідають загальноприйнятим у ЄС допустимим термінам експлуатації на регулярних маршрутах [64].

1.3 Постановка проблеми

В умовах переходу від звичної у часи СРСР системи регламентованого, незначного за сучасними мірками терміну експлуатації автобуса до ВР у 6–7 років (9 років з мінімізацією уваги при проектуванні щодо антикорозійного захисту (АЗ) і конструкційних матеріалів) до загальноєвропейської практики регламентованого терміну і практики експлуатації автобусів понад 10–15 років без ВР кузова очевидна об'єктивна необхідність реалізації/оцінки ресурсних характеристик кузова автобуса уже на стадії проектних робіт. Реалізації європейської практики системи державного технічного контролю з оцінкою відповідності стану несівної частини кузова умовам ПБ руху обумовлює і відповідності реалії акценту на дану проблему.

На основі аналізу досліджень з визначення термінів експлуатації автобусів встановлено, що в галузі автомобілебудування по визначенню довговічності кузовів автобусів інформація практично відсутня. В основному розглядається визначення довговічності залізничних вагонів, водного та повітряного транспорту [16]. Провівши аналіз наукових досліджень [17–21] встановлено, що моделювання довговічності автобуса проводилось, однак при

цьому не враховувались корозія та реальні дорожні умови. Моделювання проводилось в умовах, що відповідають режимам прискорених випробувань довговічності на лабораторному стенді. Але такі прискорені випробування не враховують одночасний вплив корозійного та втомного руйнування елементів каркасу кузова.

Провівши огляд досліджень [26–36] по технічному контролю автобусних кузовів під час експлуатації з умов ПБ встановлено, що випробування кузовів згідно Правил [3] не проводяться. Не проводиться також ІМ, щоб перевірити відповідність автобуса вимогам щодо ПБ [3] у процесі експлуатації. Тому це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробці технологічних засад технічного контролю автобусних кузовів під час експлуатації з умов ПБ.

У результаті аналізу літературних даних [40–43] встановлено, що існують варіанти визначення довговічності кузовів автобусів. Тут [40–43] відсутні дослідження по визначенні довговічності кузовів автобусів на рамному шасі. Також відсутні дослідження, які враховували б корозійні процеси кузова. Тому це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого оцінці довговічності кузова автобуса і на рамному шасі та несівної конструкції з урахуванням корозії. Все це також дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого прогностичній оцінці ресурсу кузова автобуса з використанням ІМ.

Важливим є те, що максимальний термін експлуатації автобуса обмежується ресурсом кузова. На зменшення ресурсу автобусних кузовів впливають такі фактори: автомобільні дороги низької якості; використання натрієво-хлоридних піщаних сумішей, якими посипаються дороги взимку; неналежний АЗ та несвоєчасне його оновлення; зберігання автобусів під відкритим небом; жорсткі умови експлуатації; низька якість проведених ремонтів. Після проведеного в Німеччині технічного огляду 50704 одиниць автобусів (вік автобусів від одного до двадцяти років) було встановлено, що несправності кузова (надмірна корозія, що впливає на жорсткість вузла,

ненадійність пластин або кріплень, тріщина або деформація будь-якого поздовжнього або поперечного елемента) в середньому склало 1,2% [65–67]. Це свідчить про те, що негативні чинники зведені до мінімуму. Лінійне зростання несправностей (пошкоджень) кузова починається після восьми років експлуатації. При термінах експлуатації 19–20 р. кількість відмов становить приблизно 6%, що є недосяжним для автобусів, які експлуатуються в нашій державі. Враховуючи досвід експлуатації автобусів вітчизняного виробництва на території нашої держави [8] можна вважати, що умови експлуатації, обслуговування та ремонту поки що не відповідають європейському рівню.

В Україні експлуатується значна частка автобусів (44%) [55] терміни експлуатації, яких перевищують нормативи, зокрема ще розроблені за часів СРСР. Відповідно на АТП такі автобуси ставлять на проведення першого ВР при пробігу 800 тис. – 1 млн км та терміном експлуатації 9–11 років. Під час такого ВР проводиться ремонт, або заміна агрегатів та «ВР» самого кузова.

У містах України автобусами перевозиться близько 46% пасажирів [68]. Основну частину автобусів (не менше 50%) складають автобуси малого класу: «Богдан» та «Еталон» [69]. Отже цей транспорт має вагомий вклад при формуванні транспортної системи міст. Для ефективної роботи транспорту важливо об'єктивно оцінювати витрати на експлуатацію. Нажаль ресурсні випробування цих автобусів не проводяться і це ускладнює отримання об'єктивних витрат. Але все ж таки автобуси «Богдан», «Атаман» (оновлена назва автобусів «Богдан» [70]) та «Еталон» експлуатуються понад десять років. Це дозволяє за даними АТП виявити слабкі місця конструкцій та оцінити реальні витрати на експлуатацію з одного боку. З іншого боку така інформація може бути застаріла при оцінці ресурсу нових модифікацій, з впровадженням нових технічних рішень та сучасних конструкційних матеріалів.

В роботі [8] описано досвід експлуатації (відмови деталей та їх вартість) поширених автобусів «Богдан» та «Еталон». Це в певній мірі відображає реалії експлуатації. Однак відсутні дані по витратах на технічне обслуговування, загальним витратам на експлуатацію та ВР. Крім того затрати наведені в

нормативній документації часів СРСР не відповідають сьогоднішній реальності.

Як показує багаторічний досвід експлуатації, на довговічність автобусів впливає велика кількість чинників: конструкційні (матеріали, з яких виготовлений автобус; відповідність кузова умовам рівномірності), технологічні (ефективність та довговічність антикорозійного покриття); експлуатаційні (завантаження пасажирями, якість автомобільних доріг, швидкість руху, якість технічного обслуговування та антикорозійна обробка і, як результат, інтенсивність корозії). Знаючи чинники впливу, важливо ще на ЕП оцінити ресурсні характеристики автобуса. Основною складовою автобуса, що, в першу чергу, обмежує його ресурс та є ідентифікатором при реєстрації (VIN), є кузов автобуса [48]. Тому важливо провести ПРКА. Одним із ефективних способів по вирішенню науково-прикладних задач є математичне моделювання. На сьогодні набули широкого розповсюдження засоби автоматизованого проектування з можливостями ІМ [71–75].

Досвід експлуатації автобусів громадського транспорту показує, що на маршрутах автобуси в години пік працюють з постійними перевантаженнями. Кількість одночасно перевезених пасажирів в години пік досягає вісімдесяти при пасажиромісткості 52 пасажири [8].

Швидкість руху в місті обмежена і не повинна перевищувати 50 км/год [76]. При цьому слід враховувати реалії експлуатації та не виключати можливість короткочасних перевищень швидкості руху автобуса.

Параметри мікропрофілю доріг визначені та описані у вигляді кореляційних функцій та спектральної густини [46], які отримано на основі робіт Силаєва А. А. та Хачатурова А. А.

Корозійні процеси, що супроводжуються динамічними навантаженнями, детально описані Похмурським В. І., про які сказано у роботі [47].

Таким чином виникає необхідність у розробці науково-прикладних основ прогностичної оцінки ресурсу кузовів автобусів, що б дозволило формувати їх ресурс ще на ЕП.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що автобуси при термінах експлуатації 5–10 років можуть не відповідати вимогам Правил ЄЕК ООН № 66, що пояснюється деградацією матеріалу елементів каркасу кузова та супроводжується постійним зростанням експлуатаційних витрат.

2. Можна було б припустити, що на основі досвіду 5–10-ти річної експлуатації автобусів громадського транспорту можна було б передбачити довговічність нових аналогічних моделей автобусів. Однак при розробці нових моделей автобусів, або рестайлінгу існуючих неминуче будуть застосовуватись нові технічні рішення та новітні матеріали, тому ресурс цих автобусів вже не буде знаходитись в межах, отриманих попереднім досвідом.

3. Встановлено, що відсутні дослідження з визначення ресурсу автобусів громадського транспорту з несівним кузовом та на рамному шасі, які одночасно поєднували б вагомі чинники впливу: властивості дорожнього покриття (мікропрофіль дороги), завантаження пасажирами, швидкість руху автобуса та корозію.

4. Актуальним є вдосконалення та розробка методів оцінки впливу корозії металу насамперед несівних елементів каркасу кузова на зміну фізико-механічних характеристик труб і з'єднань каркасу.

5. Виникає необхідність в узагальненні та розробці методів оцінки впливу ефекту втомної міцності елементів каркасу впродовж експлуатації на міцність і ПБ металоконструкції кузова автобуса.

6. Виникає потреба у вдосконаленні та розвитку методів оцінки і впливу корозії, втомної міцності каркасу на пасивну безпеку кузовів автобусів та оцінки критичного граничного рівня погіршення фізико-механічних характеристик металопрокату каркасу з умов відповідності законодавчій нормативній базі (Правила ЄЕК ООН № 66, № 107).

7. У зв'язку з тим, що в основному проводяться високовартісні натурні довготривалі ресурсні випробування автобусів, постає питання у розробці

програмного комплексу для імітаційного моделювання-розрахунку зміни міцності каркасу кузова автобуса залежно від пробігу і часу експлуатації під різні типові умови – сфери використання автобусів.

8. Виникає необхідність у розробці програмного комплексу для прогностичної оцінки впливу використання тих чи інших сортamentу прокату і марок сталі на зміну допустимого ресурсу кузова з умов дотримання відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки.

9. Враховуючи вимоги експлуатуючих організацій з підвищення довговічності кузовів автобусів, актуальною є розробка практичних рекомендацій по конструктивному синтезу і технології виробництва кузовів автобусів під конкретні умови та сфери експлуатації з умов забезпечення певної довговічності – термінів експлуатації та відповідність вимогам пасивної безпеки.

10. Враховуючи вимоги щодо підвищення пасивної безпеки автобусів під час експлуатації, виникає необхідність у розробці рекомендацій щодо оновлення ДСТУ 3649: 2010 шляхом уведення загальноєвропейської практики вибракування автобусів при недопустимому погіршенні міцності каркасу внаслідок корозії та втомної міцності.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ У ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ З ТЕРМІНОМ СЛУЖБИ

2.1 Динаміка експлуатаційних витрат у функції часу

Кузов автобуса – найдорожча складова і заслуговує особливої уваги. При виробництві автобусів «Богдан» (на сьогодні «Атаман») конструктори та технологи АТ «Черкаський автобус» постійно прагнуть підвищити корозійну стійкість, міцність та РКА. Однак у напруженому режимі роботи заводський захист кузова не витримує (особливо взимку при бомбардуванні кузова соляними засобами проти обмерзання доріг). Крім того в гонці перевізників за прибутком у години пік автобуси завантажуються понад технічно допустимої норми. Тому бічні металеві панелі кузова (рис. 2.1) та днище починають ржавіти вже через 3–3,5 років щоденної роботи [8, 77].



Рисунок 2.1 – Корозія бічних поверхонь автобуса «Богдан» А092

На деяких лицьових панелях кузова фарба просто відпадає клаптями, під якими місцями навіть відсутній ґрунт [77]. Від точок та ліній зварки (особливо на дверях і навколо них) відпадає шпаклівка. А місцями (навіть не біля зварних швів) кузов просто тріскається. Структурна корозія металевих деталей призводить до погіршення міцності кузова в цілому, що знижує безпечність

експлуатації. Це недопустимо і вказує на недостатню якість АЗ кузовів автобусів «Богдан» для нашої кліматичної зони. На півдні України кузов підлягає меншим проявам корозії (крім приморських зон), а в північних, центральних та західних областях корозія розвивається досить швидко. Зменшення жорсткості металевих частин кузова призводить до розтріскування та відклеювання склопластикових панелей. Передня та задня склопластикові панелі досить складні в ремонті та потребують суттєвих матеріальних витрат (в АТП відсутні фахівці, технології, інструменти та матеріали).

Гумові ущільнювачі дверей за 2–3 роки експлуатації виходять із ладу та не забезпечують герметичність по всьому периметру. Це призводить до додаткового потрапляння бруду й вологи в салон та сприяє розвитку корозії, оскільки антикорозійна обробка кузова зсередини взагалі виконана неналежним чином. Також 2–3 роки служить покриття підлоги. Потім воно розтріскується, рветься та відкриває вільний доступ вологи та сприяє інтенсивному розвитку корозії металевих частин.

Жорсткість кузова (навіть без проявів корозії), як показує експлуатація, не на достатньому рівні. Водії помічають, що як тільки кількість пасажирів перевищує 30 осіб, при попаданні у вибоїни та переїзді «лежачих поліцейських» люки по боках автобуса починають самостійно відкриватись. Руйнуються ущільнювачі між кузовними панелями, тріскаються лобові стекла та стекла фар. При цьому найдовговічнішими деталями салону виявляються панелі боковин та даху. Також проблемними місцями є праві передній та задній кути кузова. Оскільки нижня юбка кузова занадто низька, то при приспущених пневматичних балонах підвіски, низькій ефективності амортизаторів та стабілізатора поперечної стійкості передньої підвіски, при під'їзджанні до тротуару ці кути б'ються об бордюри.

Враховуючи складні умови експлуатації міських автобусів для забезпечення довготривалої роботи кузова, потрібно періодично проводити контроль наявності дефектів, своєчасно їх усувати та поновлювати антикорозійне покриття. Витрачені кошти на усунення незначних пошкоджень

(сколи фарби, подряпини, початкові осередки корозії) та регламентну антикорозійну обробку підвищать РКА. І відповідно зменшать подальші витрати на поточний або й ВР при розповсюдженні структурної корозії та втомних тріщин.

Розвитку втомних тріщин сприяють знакозмінні навантаження, зумовлені низькою якістю автомобільних доріг та завантаженням автобуса пасажирами понад норми. Але крім кузова страждають й інші складові. Зокрема передні амортизатори виходять із ладу через 1–1,5 роки (а то і раніше) а ресурс задніх 2–2,5 роки [77]. З такою несправністю, як показує практика, досить часто автобуси продовжують експлуатуватись і заміна амортизаторів відтягується на останній план. Це ще підвищує вібронавантаженість автобуса.

Також у процесі експлуатації автобуса «Богдан» виявлено ряд відмов інших складових, які потребують періодичних капіталовкладень на виконання поточного ремонту. Це низький ресурс головного, робочих гальмівних та головного циліндра зчеплення, який складає 150–250 тис. км [77]. Ресурс передніх гальмівних колодок складає всього 23–25 тис. км, задніх – 30–35 тис. км [77].

Ресурс зчеплення залежить від умов експлуатації і кваліфікації водіїв. На міських маршрутах однодискове зчеплення служить приблизно в два рази менше, ніж на міжміських – близько 50–60 тис. км [77].

У багатьох автобусах «Богдан» А092, починаючи з пробігу 2500 км, виходять з ладу редуктори склоочисників [77]. Це пояснюється великими навантаженнями, обумовленими більшою довжиною щіток склоочисників на роботу, з якими не розрахований редуктор. Тому встановлення склоочисників меншої довжини зменшує навантаження на механізми склоочисників та підвищує їх ресурс.

Неякісні патрубки вітчизняного виробництва системи охолодження потребують заміни разом із регламентною заміною охолоджуючої рідини [70].

Також слабким місцем автобуса «Богдан» А092 є повітряний компресор, ресурс якого нижчий, ніж у ЗІЛ-130 [77]. Швидко зношуються кільця, масло

потрапляє у пневмосистему і від цього виходять із ладу гумові ущільнення дверних механізмів (ремонтний комплект коштує понад 200 доларів США). Компресор розміщений таким чином, що рветься масляний шланг у системі змащування. Крім того від наявності конденсату кородує наскрізь масляний піддон компресора. Масло виливається на дорогу та втрата тиску в системі мащення призводить до виплавляння шатунних вкладишів двигуна.

Ресурс японських силових агрегатів (Isuzu 4HG1-TC, 4HE1-XS, 4HK1) заявлений виробником – 1 млн км. Однак реальний ресурс до ВР складає 600–800 тис. км залежно від умов експлуатації. На якість ВР впливають якість запчастин (застосування оригінальних японських запчастин значно скоротять подальші затрати) та кваліфікація ремонтників (спеціалістів в Україні дуже мало). Як показує досвід експлуатації проведеного стандартного ВР у вистачає приблизно на 110 тис. км. Це пояснюється руйнуванням колінчастого валу, ресурс якого японськими конструкторами закладено в межах 1 млн км. Тому, щоб забезпечити кращий ресурс (близько 400 тис. км) під час ВР двигуна 4HK1, встановлюють новий колінчастий вал турецького виробництва, що значно підвищує вартість ВР.

Враховуючи вищесказане та спираючись на досвід черкаських АТП, витрати на експлуатацію автобуса «Богдан» А092 перші 100 тис. км пробігу лежать у межах 6000 грн (рис. 2.2).

Потім, приблизно до пробігу 350 тис. км, спостерігається різке збільшення витрат. Це пояснюється затратами на усунення проявів корозії та заводських недоліків. Далі інтенсивність росту витрат зменшується при стабільному зростанні до 18000 грн (пробіг 850 тис. км та приблизно 8,5 років експлуатації). Після цього витрати різко зростають, що обумовлено проявами структурної корозії каркасу кузова і при досягненні десятилітнього терміну автобус змушені ставити на ВР.

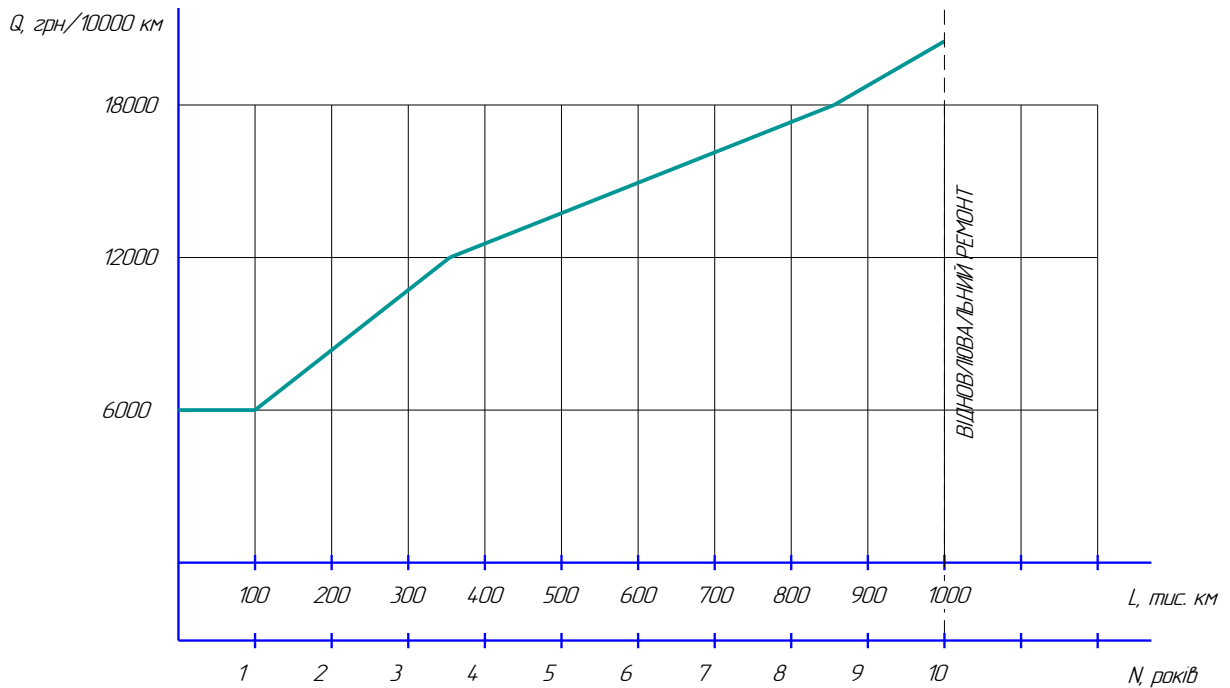


Рисунок 2.2 – Середньостатистичні сумарні витрати на поточний ремонт та ТО автобуса «Богдан А-092» залежно від терміну експлуатації та пробігу [78]

В табл. 2.1 наведено середньостатистичні витрати на ремонт та ТО автобуса «Богдан» А092.

Таблиця 2.1 – Середньостатистичні витрати на ремонт та ТО автобуса «Богдан» А092

Назва витрат	Сума витрат, грн
1	2
Сумарні витрати на поточний ремонт та ТО	
ТО-1(2)+ПР	6000 -18000
ТО-2+ПР	6000 -18000
Витрати на ВР	
ВР кузова	55000
- труби прямокутного профілю	12000
- сталеві листи	9000

Продовження табл. 2.1

1	2
- неметалеві матеріали	16000
- лакофарбові матеріали	8000
- додаткові матеріали	10000
ВР карданної передачі	10000
ВР коробки передач	20000
ВР головної передачі	20000
Витрати на заміну, ремонт інших деталей та оплату праці робітників АТП	130000
Загальні витрати на ВР	200000

Слід відзначити, що при такому ВР замінюються тільки явно пошкоджені корозією (втомними тріщинами) елементи кузова. Тому витрати на ВР складають лише 55 тис. грн, але все ж таки максимальні (табл. 2.1).

Крім наведених вище витрат у реальній практиці експлуатації автобусів можуть виникати витрати, пов'язані із зміною конструкції автобусів [8]. В умовах сьогодення з причини економії часу та коштів нововведення інколи впроваджуються в короткі строки та не завжди проводиться повноцінний розрахунок кузова автобуса МКЕ [48]. Такий підхід є неприпустимим при інтеграції із європейськими нормативними базами та введенням інспектування технічного стану транспортних засобів [65]. При створенні нових конструкцій кузовів автобусів або зміні конструкції існуючих кузовів важливим є передбачення наслідків таких змін. При цьому доцільно враховувати практичний досвід заводів-виробників, котрі вже впровадили ті чи інші нововведення.

Автобус зі зміненою конструкцією без повноцінних розрахунків проходить дорожні випробування, в процесі яких виявляються слабкі місця та усуваються на підприємстві шляхом опрацювання відповідних технічних рішень. Проблеми рівномірності каркасу можуть виявитись під час експлуатації

нових автобусів на міських маршрутах при перевезенні пасажирів. Це призводить до появи поломок (тріщин) каркасу кузова безпосередньо під час гарантійного періоду експлуатації. В цьому випадку автобус підлягає ремонту по гарантії та подальшому вдосконаленню конструкції. Відповідно в експлуатації збільшується час простою і як результат завод-виробник та АТП несуть збитки. Зокрема для модифікації автобуса А092Н6 із забудовою площадки «low-entry» у задньому звісі при пробігу близько 50 тис. км утворюються тріщини даху навпроти передніх (рис. 2.3) та задніх пасажирських дверей (рис. 2.4).



Рисунок 2.3 – Тріщина даху над передніми пасажирськими дверима

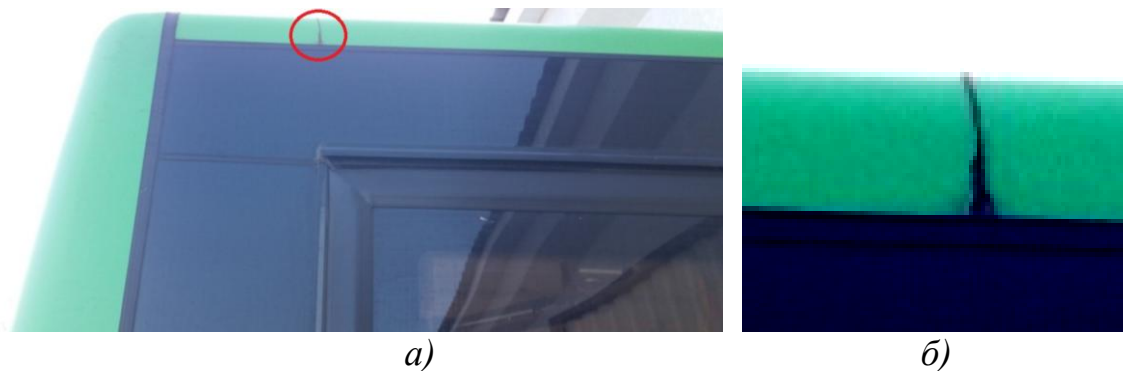


Рисунок 2.4 – Тріщина даху над задніми пасажирськими дверима: *а)* – загальний вигляд; *б)* – місце тріщини (збільшено)

Такі несправності можна пояснити послабленням правої боковини каркасу кузова та накопиченням пасажирів поблизу дверей.

Відповідно при введенні заднього низькопідлогового накопичувального майданчика на ньому кількість пасажирів може досягати в годину пік до 44

осіб. При тому, що загальна пасажиромісткість автобуса не перевищує 52 особи. Такі накопичувальні майданчики дозволяють підвищити пасажиромісткість автобуса до 100 пасажирів, що перевищує пасажиромісткість, передбачену заводом-виробником у 2 рази. Навіть при повноцінних розрахунках із використанням МКЕ закладається коефіцієнт перевантаження 1,5–1,7, чого вже недостатньо для реалій експлуатації при перегонах перевізників за прибутком.

На додачу до перевантажень суттєвий вплив мають і дороги низької якості: неякісно прокладена бруківка, вибоїни, горби тощо. В результаті такої експлуатації можуть виникати пошкодження в задній частині кузова (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Пошкодження поперечини в задній частині кузова

При такій експлуатації виходять із ладу елементи задньої підвіски: ламаються ресори (рис. 2.6), обриваються штоки амортизаторів (рис. 2.7) та обламуються упори пневморесор (рис. 2.8).



Рисунок 2.6 – Обламування задніх ресор



Рисунок 2.7 – Обірваний шток амортизатора задньої підвіски



Рисунок 2.8 – Обламаний упор пневморесори задньої підвіски [79]

При постійному перевантаженні в години пік та пасажирообороті не менше тисячі пасажирів у день, що є характерним для міст з кількістю населення понад 1 млн жителів (наприклад у м. Київ), неминуча поява тріщин каркасу основи у задній частині кузова (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Втомна тріщина каркасу основи кузова в задній частині

Також виникають проблеми з передньою частиною каркасу кузова. У результаті експлуатації при пробігу близько 60 тис. км утворюються тріщини каркасу основи. Пошкоджуються основні повздовжні лонжерони перерізом $140 \times 60 \times 3$ мм (це стосується у першу чергу правого лонжерона) (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Тріщини правого лонжерона перерізом $140 \times 60 \times 3$ мм

Також розтріскуються труби, що з'єднують цей лонжерон із правою боковиною (рис. 2.11). Пошкодження правої частини пояснюється більшим навантаженням на праву сторону автобуса, рухом по узбіччю, ударами в бордюри тощо.



Рисунок 2.11 – Тріщина труби каркасу основи кузова в передній частині

Таким чином реалії експлуатації з перевантаженням автобусів за рахунок формування додаткової площі для накопичення пасажирів на площадках типу «low-entry» у поєднанні з реаліями незадовільного стану доріг призводять до поломок каркасу кузова в гарантійний період при пробігах до 100 тис. км та термінах експлуатації менше двох років. Це у свою чергу обумовлює і доцільність перегляду-уточнення граничних умов для розрахунку МКЕ каркасу кузова з урахуванням нерівномірності розподілу стоячих пасажирів по поздовжній осі кузова та відповідного вдосконалення структури та сортаменту труб каркасу кузова. В роботі [80] також визначено взаємозв'язок дефектів кузова спеціального автобуса, умови експлуатації якого мають ряд особливостей.

Витрати на експлуатацію автобусів «Еталон» подібні до розглянутих, але мають деякі особливості, що детально описані в статті [77]. Статистичні дані накопичені по даним ТОВ «Бровариавтопас» де експлуатуються автобуси «Еталон» моделей А079.04 і А079.14, пробіг яких становить від 500 до 600 тис. км [77]. Пробіг багатьох туристичних і міжміських автобусів цієї марки вже давно перевищив мільйон кілометрів. Якщо порівнювати стан автобусів, що обслуговують міжміські та міські маршрути, то стан міжміських автобусів буде кращий. Міжміські автобуси працюють на маршрутах із більш стабільною швидкістю та кращих дорогах. Автобуси на міських або приміських маршрутах працюють із постійними зупинками і великими піковими пасажиропотоками. При таких пробігах проблем із двигунами не було (ресурс двигуна становить близько 700 тис. км). Компресори повітряної системи, на відміну від автобусів марки «Богдан», незважаючи на досить великий пробіг, продовжують працювати без будь-яких нарікань. При чому при зливанні конденсату із повітряних ресиверів мастило відсутнє, що вказує на нормальну роботу компресорів. Оскільки в пневматичну систему не потрапляє мастило, вся пневматика автобуса працює безвідмовно. У тому числі до пневматики дверей претензій немає, хоча їх привід свого часу був недостатньо надійним – верхній чавунний важіль мав недостатній поперечний переріз та часто

руйнувався. Після рекламаций на завод-виробник цей дефект уже усунений шляхом заміни на важелі вдосконаленої конструкції. Коробки переключення передач працюють практично безвідмовно. За винятком того, що на одній із дванадцяти машин, був замінений один із двох підшипників первинного валу. До ходової частини автобуса також претензій немає при такому пробігу. Хіба що через три роки експлуатації спостерігається зношування втулок і пальців підвіски. Ресори також без проблем витримують три роки і після цього на деяких автобусах, що рухаються по маршрутах із низькою якістю доріг, починають руйнуватися кореневі і підкореневі листи. Рідше руйнується товстий нижній лист ресори. Слід відзначити, що руйнування листів ресор в основному відбувається в зимовий період через неприбрані дороги.

Кермовий механізм до п'яти років експлуатації не потребує ніякого втручання. Після п'ятирічного терміну експлуатації інколи манжети починають пропускати мастило та потребують заміни. Заводські шарніри кермової трапеції мають ресурс у межах 100–150 тис. км пробігу. А в кермових шарнірах, які йдуть у запчастини, як правило, ресурс менше 100–150 тис. км.

Гальмівна система не викликає ніяких нарікань. При добовому пробігу близько 400 км колодок вистачає приблизно на три місяці, або 30 тис. км пробігу. Єдине, що вимагає втручання – це діафрагма гальмівного механізму. Але таке трапляється дуже рідко – в середньому на кожному автобусі протягом п'яти років замінювали по одній діафрагмі гальмівної камери.

Із кузовом автобусів «Еталон» критичних поломок не виникає, хоча їх корозійна стійкість не на високому рівні.

В автобусі «Еталон» найбільша кількість проблем виникає з електрикою, хоча серйозними їх теж назвати складно. Дроти мають невеликий переріз, а ті дроти, що йдуть по днищу, взимку обростають кригою і їх (особливо на задніх ліхтарях) часто просто відривають. Подібне раніше відбувалося і з ліхтарями номерних знаків, дуже тонкі дроти яких, під дією бруду досить швидко руйнуються.

В іншому електрообладнання в автобусі «Еталон» досить надійне, хоча його обслуговування може бути пов'язане з рядом незручностей. Генератори і стартери служать практично без проблем – за п'ять років на дванадцяти автобусах необхідність у заміні виникла тільки для двох стартерів. Хоча без їх поточного ремонту (в першу чергу заміни втулок і реле втягування) не обійтися.

Електродвигуни обдування вітрового скла, а також електродвигуни обігрівачів, встановлених у салоні, досить часто виходять із ладу. При цьому електродвигуни склоочисників досить надійні, за п'ять років їх довелося купити всього два із дванадцяти. А ось пластикові шестерні склоочисників, доводиться міняти приблизно раз у рік.

Для уявлення про витрати на найчастіше затребувані запасні запчастини автобуса «Еталон» А079 наведено дані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Вартість найчастіше затребуваних запасних частин для автобусів «Еталон» А079 [77]

Найменування	Вартість, грн
Лист ресори	1100
Наконечник кермової тяги	740
Палець поздовжньої тяги	650
Накладки гальмівні (на вісь)	440–630
Ремінь привідний	180–260
Фільтр масляний/повітряний	180–260
Фільтр паливний	90
Шестерні склоочисника	550

2.2 Система поточних та відновлювальних ремонтів

На українському ринку одне із провідних місць займають автобуси виробництва АТ «Черкаський автобус». Тому далі буде наведена система поточних та ВР на прикладі автобусів, що випускається даним підприємством. Станом на 2023 р. завод випускає автобуси моделей: А092Н6, А09216, D093S2/S4. Гарантійний термін складає 2 роки, або 100 тис. км пробігу (що наступить раніше) [81]. В Україні є 23 авторизованих СТО, що забезпечують гарантійне та післягарантійне обслуговування цих автобусів.

Для того щоб підтримувати автобус в належному стані, необхідно регулярно проводити технічне обслуговування відповідно до вимог [82].

Технічне обслуговування містить у собі такі етапи:

1. Щоденне технічне обслуговування.
2. Технічне обслуговування в початковий період експлуатації – через 1000 км, 5000 км пробігу, а потім через кожні 10000 км.

Згідно настанови [82] подальше ТО проводиться кожні 10000 км, або 1 раз у рік, тобто що наступить раніше. Але, враховуючи інтенсивність роботи автобусів громадського транспорту за 1 рік експлуатації, пробіг автобуса може наблизитися до 100000 км, тому послідуєчі ТО виконуються на основі пробігу через кожні 10000 км.

У табл. 2.3 наведена система поточних та ВР в автобусів «Богдан» А092

Таблиця 2.3 – Система поточних та ВР автобусів «Богдан» А092

Найменування	Кількість ВР	Ресурс		ВР		К-ть днів про- стою за 1 ВР
		км	роки	Трудовитрати, люд.-год.	Вартість одного ВР, грн	
1	2	3	4	5	6	7
Двигун	1-й	1005000	10	73	65000	6
	2-й	110000	1			

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7
КПП	6	500000 80000	5 0,8	12	25000	2
Карданна передача	11	100000	1	3	2500	1
Головна передача	5	600000 100000	6 1	5	7500	2
Передня підвіска		20000	0,2	18	10500	1
Задня підвіска		20000	0.2	6	9500	1
Кузов	1	850000	8,5		55000	30
Зчеплення	8	120000	1,2	3,5	2500	0,5

Як видно із табл. 2.3, під час ВР кузова при максимальних витратах ще буде і максимальний час простою. Також існує велика база даних із несправностей автобусів в гарантійний період, які не входять до витрат експлуатуючої організації (рис. 2.2), оскільки є гарантійними випадками. Для уявлення про систему відмов у гарантійний період у табл. 2.4 наведено окремі несправності автобусів у за 2005–2017 рр.

Таблиця 2.4 – Окремі несправності автобусів 2005–2017 рр. випуску у гарантійний період

Несправність	Кількість випадків	Марка автобуса	Рік випуску	Пробіг, км
1	2	3	4	5
Несправності ДВЗ та систем				
Падіння компресії ДВЗ (негерметичність клапанів)	1	A-081	2005	5000

1	2	3	4	5
Негерметичність прокладки головки блока ДВЗ	1	A-081	2005	42000
ДВЗ не розвиває повної потужності (різкі постріли з кожуха повітряного фільтра)	1	A-092	2005	16062
Підвищена димність ДВЗ		A-231	2005	-
Зониження компресії у третьому циліндрі ДВЗ	1	A-092	2005	900
Вихід із ладу підшипників натяжного ролика приводу компресора	5	A-091	2005	5000, 25500
ДВЗ потребує ремонту	1	A-091	2005	70000
Поломка шестерень приводу ПНВТ	1	A-092	2005	26743
Заклинила рейка ПНВТ	1	A-067	2005	-
Несправність ПНВТ	1	A-144	2005	2100
Удар випускного клапана 1-го циліндра об поршень (зігнутий випускний клапан, тріснула направляюча клапана, пошкоджений маслорозподільник).	1	A-092	2005	1500
Підвищена витрата масла ДВЗ (близько 0,5 л на 100 км)	1	A-092	2005	8000

1	2	3	4	5
Несправність радіатора системи охолодження	1	A-231	2005	12889
	1	A-144		10753
Подвійний рівень масла в картері ДВЗ	1	A-081	2005	12236
Попадання води в циліндри (гідроудар)	2	A-092	2005	-
Масло проникає з системи мащення турбокомпресора в випускний та впускний колектори	1	A-092	2005	20205
Протікання антифризу через випускную трубу Webasto	1	A-092	2005	1850
Несправні передні подушки кріплення ДВЗ	2	A-144	2005	4835
Протікання масла через прокладку піддона картера	1	A-092	2005	-
Несправності КПП				
Несправність КПП	3	A-081	2004, 2005	8381, 8000, 45098
	8	A-144	2005	44365, 20000, 35120, 36862,
	3	A-092	2005	65850, 21108, 3980

1	2	3	4	5
Вихід із ладу троса КПП	4	A-081	2005	650, 8381, 35000, 40000
Не включається передача задньої швидкості з кабіни водія	1	A-144	2005	2100
Вібрація КПП	1	A-145	2005	-
Несправності зчеплення				
Вихід із ладу витискного підшипника	3	A-081	2005	8286, 32000
Вихід із ладу веденого диска	4	A-081	2005	8286, 35000, 32000
Вихід із ладу нажимного диска	2	A-081	2005	8286
Обрив кронштейна кріплення пневмопідсилювача зчеплення	1	A-081	2005	8286
Негерметичність робочого циліндра зчеплення	2	A-081	2005	-
Негерметичність шланга зчеплення	1	A-081	2005	-
Несправності та поломки кузова				
Відірваний лонжерон задньої правої ресори	1	A-081	2005	8286

1	2	3	4	5
Тріщина вітрового скла	7	A-092	2005	2200, 30000, 17750, 1695, 2100, 27500, 18500
Неправильна геометрія пройми вітрового скла	1	A-092	2005	55315
Пошкодження фіксаторів кріплення пасажирських сидінь	1	A-145	2005	4300
Несправність механізму відкриття пасажирських дверей	1	A-067	2005	1613
Поломка верхнього кронштейна пасажирських дверей	1	A-081	2005	9440
Тріщина передньої поперечини рами	1	A-081	2005	48992
Несправність внутрішньої оббивки даху	3	A-081	2005	4267, 12236, 27500
	1	A-092		20000
Руйнування каркасу спинки сидіння	2	A-092	2005	1350, 6910

1	2	3	4	5
Перекіс заднього мосту (кронштейн кріплення переднього кінця задньої правої ресори зміщений)	1	A-092	2005	4900
Обрив кронштейна кріплення амортизатора	2	A-081	2005	39000
Відклеювання передньої маски над верхньою проймою дверей водія та бічних стекол	1	A-092	2005	3400
Пошкодження зварних з'єднань балки кріплення реактивних тяг	1	A-144	2005	-
Відклеювання бічних стекол	2	A-145	2005	4000
Протікання даху	2	A-145	2005	-
Вихід із ладу амортизаторів капота	1	A-145	2005	-
Несправності гальмівної системи				
Несправність вакуумного підсилювача гальм	1	A-091	2005	813
Вихід із ладу механізму автоматичного підведення гальмівних колодок	1	A-092	2005	71000
Несправність ABS	1	A-145	2005	4300
Руйнування стяжної пружини гальмівних колодок	2	A-231, A-081	2005	740, 39000

1	2	3	4	5
Руйнування зворотної пружини пневмокамери приводу заслінки гірського гальма	1	A-092	2005	66251
Відмова датчика гірського гальма	1	A-092	2005	19945
Несправності кермового управління				
Несправність кермового управління	1	A-231	2005	-
Несправність поздовжньої кермової тяги	2	A-081	2005	86031
Несправність гідропідсилювача	2	A-144	2005	11665
Відкручування болтів кріплення кермового механізму	2	A-144	2005	-
Несправності підвіски				
Вихід із ладу амортизаторів	15	A-092	2005	720, 2500, 2800, 2100, 27500, 4060, 9450, 498, 1250, 390, 1920
	1	A-231		7010

1	2	3	4	5
Несправність реактивних тяг	1	A-144	2005	31514
	1	A-145		15000
Несправність стабілізаторів поперечної стійкості	3	A-067	2005	-
Несправності електрообладнання				
Вихід із ладу стартера	1	A-092	2005	26743
	3	A-081		53900, 53900, 31918
Несправність приводу очисника вітрового скла	2	A-067	2005	18754
	1	A-092		4950
Несправність тахометра	1	A-145	2005	4300
Несправність спідометра	2	A-145	2005	4300, 4000
Відмова електроприводу відкривання пасажирських дверей	2	A-067	2005	12787
Несправність покажчика рівня палива	1	A-231	2005	-
Перегорання лампи протитуманної фари	1	A-092	2005	2133
Тріщина протитуманної фари	1	A-092	2005	1350
Не виключається стоп-сигнал	1	A-145	2005	4000
Відмова кнопки зупинки двигуна на панелі приладів	1	A-092	2005	-

1	2	3	4	5
Відмова кнопки включення підвищених/понижених передач під педаллю зчеплення	1	A-144	2005	-
Несправності заднього моста				
Поломка піввісі	1	A-081	2005	35000
Колеса, шини				
Підвищений знос шин	6	081	2005	35000
Несправність інших систем				
Порушення герметичності в механізмі регулятора положення кузова	6	A-091, A-092	2005	5000, 25500, 4000
Несправність компресора	3	A-092	2005	752, 14000, 20000
Негерметичність трубопроводу підведення мастила до компресора	5	A-091	2005	5000, 25500,
	1	A-092		3980
Несправність кронштейна кріплення компресора кондиціонера	1	A-091	2005	1000
Несправність кондиціонера	4	A-092	2004, 2005	7000, 38650, 3158
Несправність запобіжного клапана ресивера	1	A-092	2005	4850

1	2	3	4	5
Недостатній тиск у пневмосистемі	1	A-092	2005	4944
Негерметичність вологомасловідділювача	1	A-092	2005	1100
Тріщини патрубку радіатора опалення салону	7	A-092	2005	250
Вібрація по кузову	1	A-145	2005	4000
Вихід із ладу лебідки запасного колеса	1	A-091	2004	40000

Під час експлуатації автобусів, враховуючи складні умови експлуатації на міських маршрутах, можуть виникати ті чи інші поломки. Несправності бувають різного характеру та можуть підлягати гарантійному ремонту. Несправності, що спричинені неправильною експлуатацією та несвоєчасним обслуговуванням, не підлягають гарантійному ремонту.

Як показує практика експлуатації автобусів «Богдан» А092, за останні десять років завдяки вдосконаленню конструкції кузова, поломки каркасу кузова в гарантійний період стали практично неможливими. Однак в автобусах нових конструкцій, зокрема, «Атаман» А09620, спостерігаються деякі поломки каркасу кузова. Інженери заводу терміново вирішують питання щодо підсилення тих чи інших слабких місць. Застосовують нововведення при гарантійному ремонті та виробництві автобусів. Вихід із ладу інших деталей чи агрегатів, що не виготовляються на АТ «Черкаський автобус» (поломка компресора, розтріскування вітрового скла, розтріскування віконного гумового профілю, вихід із ладу радіатора системи охолодження, вихід із ладу електродвигуна обдуву вітрового скла, вихід із ладу датчиків ABS тощо) пояснюються неякісним виготовленням цих комплектуючих. Над цією проблемою фахівці заводу постійно працюють, висувають рекаламації виробникам комплектуючих,

або взагалі змінюють постачальника. Крім того на оновлених автобусах «Атаман» А092Н6 виникають проблеми узгодження нових комплектуючих із кузовом. Зокрема встановлення оновленої панелі приладів потребує розробки нових кріплень. Як показують реалії експлуатації по дорогах низької якості з пробігом за 40000 км панель приладів під дією вібрації починає розхитуватись та скрипіти. Тому інженери-конструктори підвищують жорсткість каркасу кузова в місці кріплення панелі приладів. Такі зміни конструкції впроваджуються в подальше виробництво. Аналогічно усуваються й інші недоліки конструкції автобуса.

На основі аналізу несправностей під час гарантійного обслуговування можна виділити такі причини поломок:

- низька якість автомобільних доріг;
- перевантаження автобуса, особливо в період обкатки;
- неякісне виготовлення деяких комплектуючих;
- неузгодженість нових машинокомплектів із каркасом кузова;
- відсутність тривалих випробувань по доведенню конструкції автобусів перед запуском у серійне виробництво, що відповідають реальним умовам експлуатації.

Таким чином для зменшення кількості відмов при гарантійному обслуговуванні доцільно проводити випробування автобусів в умовах, що відповідають реальним режимам експлуатації.

Реальні режими експлуатації не відповідають заводським технічним вимогам та технічним характеристикам автобусів. Спостерігаючи за роботою перевізників встановлено, що необкатані автобуси завантажуються у перші дні експлуатації понад норму, а низька якість автомобільних доріг підвищує вірогідність виникнення поломок.

Тому враховуючи вищесказане доцільно проводити розрахунки каркасу кузова відповідно до [48], обираючи максимальні значення вібрацій та навантажень. Також доцільно враховувати вібрації (амплітуди, частоти) при виборі навісного обладнання, електричної та електронної апаратури.

Щодо перевізників, то для правильної обкатки, автобуси доцільно використовувати на маршрутах із мінімальним завантаженням та звести до мінімуму експлуатацію в години пік.

2.3 Формування критичних термінів служби кузовів та автобусів

Дотримання своєчасного технічного обслуговування [82], періодичного АЗ, виявлення проблемних місць та своєчасне усунення несправностей дозволяє підвищити довговічність та надійність автобуса вцілому та зменшити час простою. Це дозволить зменшити витрати на експлуатацію. За даними експлуатуючих організацій в Україні встановлено, що день простою автобуса коливається, в залежності від маршруту та часу роботи, в межах 75–170 доларів США.

Детальний аналіз проблемних місць автобусів полегшує роботу конструкторського відділу заводу при вдосконаленні конструкції автобусів та підвищення їх надійності та довговічності.

Основним чинником, який обмежує термін експлуатації автомобілів, в тому числі й автобусів, є корозійні руйнування несівних елементів каркасу кузова. Кузови автобусів бувають рамної або цільної несівної конструкції типу «монокок». На сьогодні автобуси із кузовами типу «монокок» (рис. 2.12) набули найбільшого використання у зв'язку із нижчою собівартістю та масою у порівнянні з автобусами, кузов яких встановлюється на раму [83].

Використовуючи сучасні методи розрахунків [48] та сучасне програмне забезпечення, міцність автобусів типу «монокок» не поступається (за умов дотримання рівномірності), а то і перевищує міцність автобусів рамної конструкції.

Для детальної оцінки проявів корозії та її впливу на міцність кузова розглянуто конструкцію каркасу кузова поширеного автобуса «Богдан» виробництва АТ «Черкаський автобус» (на сьогодні на АТ «Черкаський автобус» це марка «Атаман»).

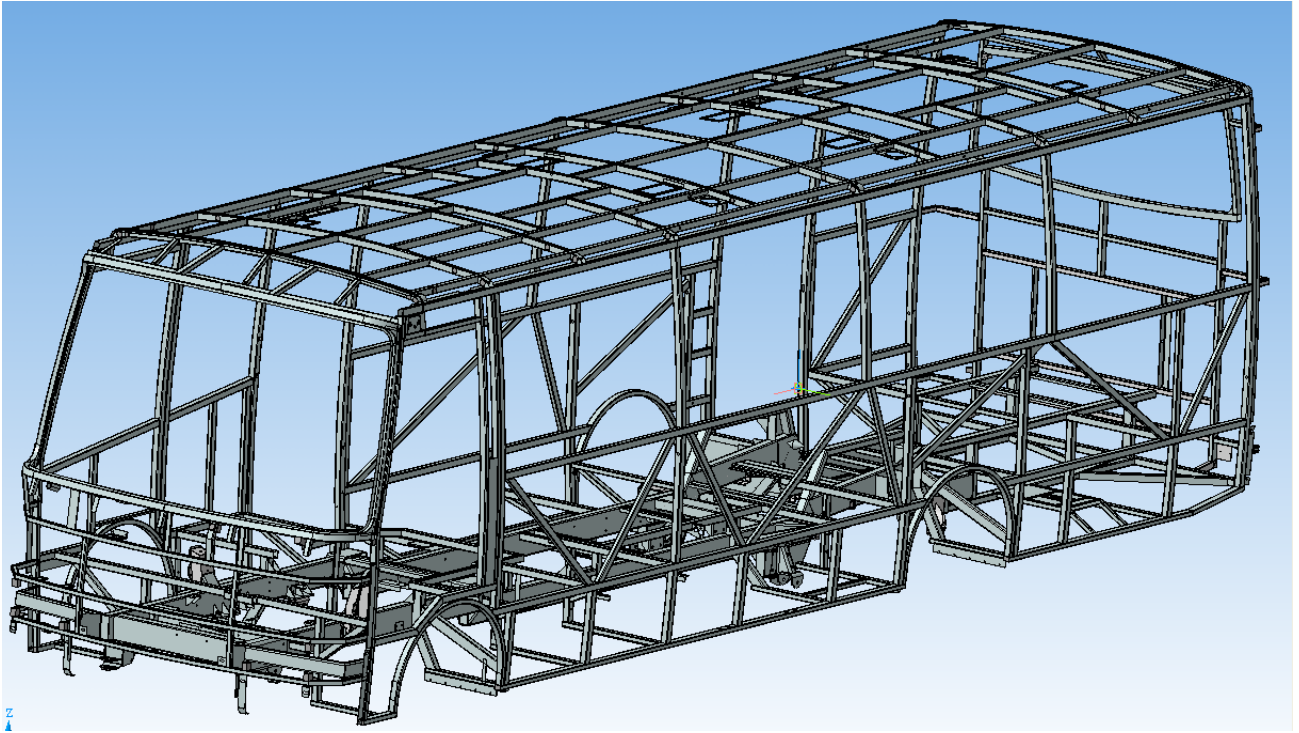


Рисунок 2.12 – Каркас кузова (КК) автобуса «Атаман» А09306

КК автобуса «Атаман» А09306 (рис. 2.12) цільної конструкції типу «монокок» виготовляється зі сталевих профілів замкнутого прямокутного перерізу ($140 \times 60 \times 3$, $60 \times 40 \times 3$, $40 \times 40 \times 2$, $40 \times 28 \times 1,5$, $28 \times 25 \times 1,5$ мм), з'єднаних між собою електродуговим зварюванням. КК складається із каркасу основи (рис. 2.13), каркасів лівої і правої боковин, каркасу даху, а також каркасів передньої і задньої частини автобуса. Матеріал каркасу основи – Сталь 20, а всіх інших елементів каркасу кузова – Сталь 10.

Каркас основи – це основний несівний елемент каркасу кузова, від довговічності якого в першу чергу залежить довговічність і надійність кузова вцілому. Каркас основи складається із двох паралельних лонжеронів, виконаних із профілю $140 \times 60 \times 3$ мм. Лонжерони розміщені на відстані 720 мм та об'єднані між собою за допомогою поперечин електродуговим зварюванням. Верхня площина лонжеронів задньої частини каркасу основи знаходиться на 140 мм нижче площини передньої частини, що забезпечує можливість знизити висоту підлоги та центр маси автобуса.

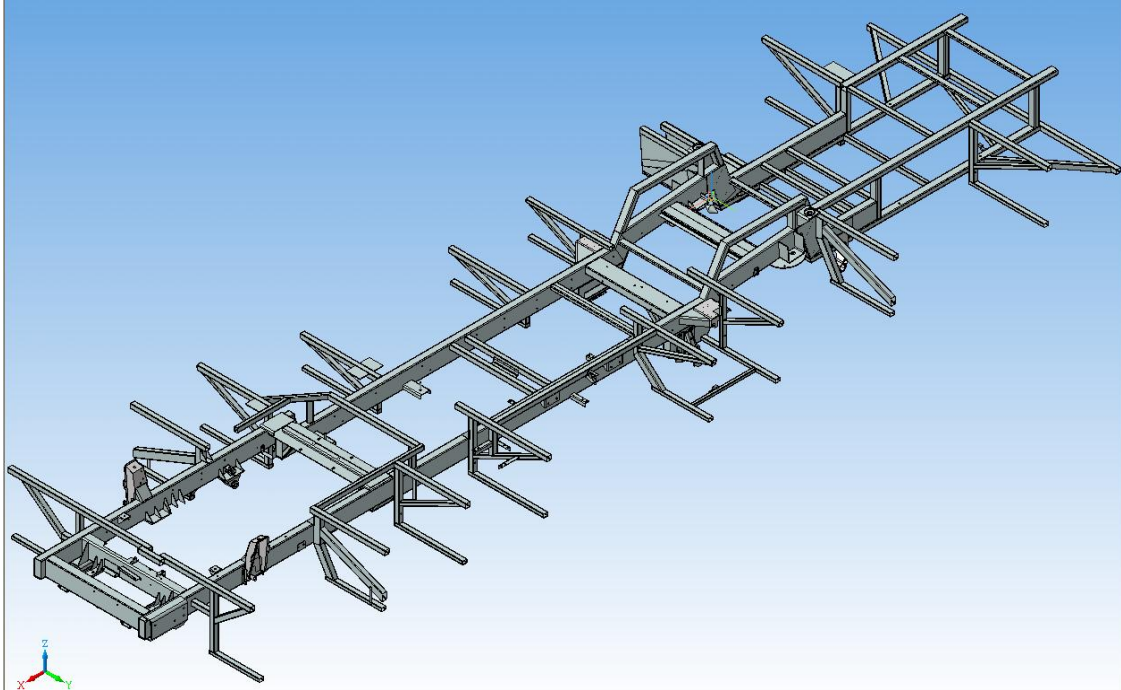


Рисунок 2.13 – Каркас основи кузова автобуса «Атаман» А09306

До лонжеронів каркасу основи з обох боків приварені поперечини, які слугують для приєднання каркасів боковин, передньої і задньої частин. В районі задніх арок (рис. 2.14, б) з обох боків лонжеронів кріпляться опори пневморесор, кронштейни амортизаторів, листових ресор, а також скоби для кріплення провідників системи електропостачання автобуса. До задньої поперечини основи приварено буксирувальний пристрій. Як показує практика, в перші 1–2 роки експлуатації лонжерони каркасу основи зовні практично не мають проявів корозії. Це можна пояснити наявністю заводського захисту. Однак у процесі експлуатації зовнішнє антикорозійне покриття зношується під дією негативних чинників. АЗ лонжеронів руйнується шляхом бомбардування днища автобуса піском, продуктами зношування дорожнього покриття (гравій, щебінь, уламки асфальту) та іншим брудом. На рис. 2.14, а зображений фрагмент поздовжнього лонжерона автобуса «Богдан» А092 (термін експлуатації 9 років), з пробігом 950 тис. км, що експлуатувався цілорічно при перевезенні пасажирів у м. Черкаси.



а)

б)

Рисунок 2.14 – Порівняння фрагментів лонжеронів каркасу основи автобуса «Богдан» А092 в районі задніх арок: а) – уражений корозією та підлягає заміні (термін експлуатації 9 років); б) – новий

При цьому лонжерон має наскрізну корозію (рис. 2.15). Наскрізна корозія у верхній частині лонжеронів профілем 140×60×3 мм (рис. 2.15, а) пояснюється налипанням бруду в суміші із засобами проти обмерзання доріг та постійною наявністю вологи.



а)

б)

Рисунок 2.15 – Наскрізна корозія лонжеронів каркасу основи автобуса «Богдан» А092 (термін експлуатації 9 років) в районі задніх арок: а) – верхня частина лонжерона профілем 140×60×3 мм; б) – нижня частина лонжерона профілем 140×60×3 мм

Своєчасна та регулярна мийка днища кузова, контроль цілісності захисного антикорозійного покриття дозволить уникнути таких ушкоджень. Однак при напружених графіках роботи (з 6.00 до 23.00 години) в реальній практиці експлуатації, особливо в холодну пору року, при відсутності теплового місця для мийки автобусів такі заходи не виконуються. Наскрізна корозія у нижній частині лонжеронів профілем $140 \times 60 \times 3$ мм (рис. 2.15, б) пояснюється накопиченням вологи із внутрішньої частини лонжеронів та пошкодженням АЗ зовнішньої частини.

На рис. 2.16 наведено приклад прояву зовнішньої корозії (рис. 2.16, а) фрагменту лонжерона профілем $140 \times 60 \times 3$ мм автобуса «Богдан» А092 (термін експлуатації десять років) та зменшення товщини стінки цього лонжерона з 3,0 до 0,8 мм (рис. 2.16, б). Як видно з рис. 2.16, б корозія лонжерона протікає по верхній зовнішній частині (на рис. 2.16, б з лівого боку) та по нижній внутрішній порожнині (на рис. 2.16, б з правого боку).

Руйнування внутрішньої порожнини відбувається під дією вологи (особливо внизу) і це пояснюється руйнуванням заводського захисту, його відсутністю та не оновленням експлуатуючою організацією. Волога проникає ззовні та утворюється конденсат. Наліпання бруду призводить до перекриття дренажних та вентиляційних отворів, що додатково інтенсифікує корозійні процеси внутрішніх порожнин [84].

Під час експлуатації при послабленні конструкції під дією знакозмінних навантажень відбувається корозійне розтріскування лонжеронів у слабких та більш навантажених місцях (рис. 2.17). Крім того, при подальшій експлуатації неминучий обрив кріплень таких елементів підвіски як ресор та амортизаторів, що і змушує такий автобус ставити на ремонт.



a)

б)

Рисунок 2.16 – Зовнішня та внутрішня корозія лонжеронів каркасу основи профілем 140×60×3 мм автобуса «Богдан» А092 в районі задніх арок:

a) – зовнішня корозія фрагменту лонжерона; б) – розріз, що показує зменшення товщини стінок лонжерона



a)

б)

Рисунок 2.17 – Появи тріщини лонжерона каркасу основи профілем 140×60×3 мм автобуса «Богдан» А092 неподалік площадки пневморесори:

a) – фрагмент труби каркасу основи з тріщиною; б) – місце тріщини (збільшено)

На автобусах «Еталон» А079 через сім років експлуатації неминучі прояви структурної корозії основи каркасу кузова (рис. 2.18).



а)

б)

Рисунок 2.18 – Корозія каркасу автобуса «Еталон» А079 після семи років експлуатації: а) – задня частина автобуса б) – передня частина автобуса

При цьому такі елементи, виходячи з умов міцності та ПБ, підлягають заміні. Каркаси боковин складаються з вертикальних елементів – стійок, які з'єднуються між собою за допомогою повздовжніх елементів. Повздовжні елементи утворюють надвіконний та підвіконний бруси, а також вузли нижнього поясу. Каркаси боковин за допомогою електродугового зварювання з'єднуються з поперечинами основи і каркасом даху. В передній частині кузова через підсилювач, закріплений за допомогою точкового зварювання до каркасу основи, з обох боків приєднується ферма, яка підсилює передню частину кузова, підвищує її міцність та жорсткість. Елементами каркасу боковин в тому числі є дверні стійки, виконані з профілю $40 \times 40 \times 2$ мм та $40 \times 28 \times 1,5$ мм. Досвід експлуатації автобусів показує, що найчастіше корозії підлягають боковини нижче віконного бруса. На рис. 2.19 зображено автобус (термін експлуатації 9 років), в праву боковину якого вже вварені нові ремонтні труби, включаючи підвіконний брус. Також із рис. 2.19 видно корозійні руйнування поблизу

сходинок передніх пасажирських дверей. Вузли нижнього поясу, близько колісних арок, взагалі згнивають і починають висипатись.



Рисунок 2.19 – Корозія каркасу автобуса «Богдан» А092, на якому частково відремонтована права боковина (термін експлуатації 9 років)

На рис. 2.20 показані корозійні руйнування правих боковин автобусів «Богдан А-092», при чому один після десятилітньої експлуатації у м. Черкаси (рис 2.20, а), а інший після п'яти років експлуатації у м. Київ (рис. 2.20, б).

На рис. 2.21 зображені корозійні руйнування лівих боковин автобусів «Богдан» А092 після 9–10 років експлуатації. Акумуляторний відсік руйнується корозією у першу чергу (рис. 2.21, б).



а)

б)

Рисунок 2.20 – Корозія правої боковини автобусів «Богдан» А092 біля переднього колеса: а) – термін експлуатації десять років; б) – термін експлуатації п'ять років



а)

б)

Рисунок 2.21 – Корозія лівої боковини автобусів «Богдан» А092: а) – термін експлуатації десять років; б) – термін експлуатації дев'ять років (корозія акумуляторного відсіку)

Каркас даху складається із п'яти повздовжніх елементів і восьми поперечин. Поперечини суцільні, виготовлені з профілю 40×40×2 мм та 40×28×1,5 мм. Повздовжні елементи, виготовлені з профілю 40×28×1,5 мм, приварені до поперечин. Поперечні елементи даху знаходяться в одній площині зі стійками боковин та поперечинами основи і разом утворюють замкнутий

контур, що забезпечує жорсткість каркасу кузова вцілому. Корозія каркасу даху мінімальна (рис. 2.22), тому елементи даху не підлягають заміні навіть через десять років експлуатації. Ремонт каркасу даху полягає тільки в очищенні від незначних проявів корозії, підготовці та нанесенню антикорозійного покриття. Практична відсутність корозії на каркасі даху пояснюється достатньою вентиляцією та відсутністю проникнення вологи ззовні.

Каркас задньої частини автобуса складається із трьох дуг, котрі з'єднуються із боковинами та продовжують їх повздовжні елементи. Верхня і середня дуги формують проїму заднього вікна. На верхній дузі знаходяться три елементи, що з'єднують каркас задньої частини автобуса з каркасом даху. На рис. 2.22 показано каркас задньої частини автобуса з терміном експлуатації дев'ять років у процесі ремонту. З рис. 2.22 видно, що нижче заднього вікна замінені всі елементи каркасу, які були зруйновані корозією.



Рисунок 2.22 – Автобус «Богдан» А092 після дев'яти років експлуатації під час ремонту (заміна пошкоджених елементів каркасу)

Каркас передньої частини автобуса утворюється двома вертикальними стійками та чотирма поясами-дугами, котрі формують проїму вітрового скла та дають можливість розміщення елементів кріплення склоочисників та приладів освітлення. З'єднання каркасу передньої частини проходить по лініях, що знаходяться на продовженні поздовжніх елементів боковин та даху. На рис. 2.23 показано незначні прояви корозії каркасу передньої частини автобуса «Богдан» А092 після дев'яти (рис 2.23 а) та п'яти (рис 2.23 б) років експлуатації. Елементи каркасу не підлягають заміні та у місцях незначних проявів корозії очищуються від іржі, підготовлюються та покриваються антикорозійними засобами.



а)



б)

Рисунок 2.23 – Незначні прояви корозії каркасу передньої частини автобуса «Богдан» А092: а) – після дев'яти років експлуатації; б) – після п'яти років експлуатації

З правого боку каркасу кузова до поперечини основи приварені каркаси передньої та задньої сходинок. На рис. 2.24 зображено прояви корозії каркасу передньої пасажирської сходинки автобуса «Богдан» А092 після дев'яти років експлуатації. Каркас передньої сходинки очищуються від іржі, підготовлюються та покриваються антикорозійними засобами. Каркас задньої сходинки підлягає заміні.



Рисунок 2.24 – Корозія каркасу передньої пасажирської сходинок автобуса «Богдан» А092 після дев'яти років експлуатації

В передній частині каркасу кузова в зоні силового агрегату приварений до каркасу боковин каркас моторного відсіку, який виконаний із профілів прямокутного перерізу $40 \times 40 \times 2$ мм та $40 \times 28 \times 1,5$ мм. Каркас моторного відсіку формує основу для перегородки, що відділяє силовий агрегат від салону та містить у собі проїми люків для обслуговування. Каркас моторного відсіку (рис. 2.25) за п'ять років експлуатації вражений корозією без порушення структури, тому після очищення від корозії та підготовки покривається захисними засобами.

У зоні пасажирського салону по правому та лівому бортах приварені підставки для забезпечення відповідної висоти розміщення пасажирських сидінь. Каркаси підставок виконані із профілів прямокутного перерізу $28 \times 25 \times 1,5$ мм, котрі також вражаються корозією і відповідно деякі елементи підлягають заміні.

КК має зовнішнє облицювання, що створює безпечні умови пасажирських перевезень, задає загальну архітектуру дизайну екстер'єру автобуса. Крім того зовнішнє облицювання частково сприймає зусилля навантажень несівної

системи автобуса. Для підвищення антикорозійної стійкості на автобусах виробництва АТ «Черкаський автобус» дах та нижня частина боковин спочатку виготовляються з оцинкованої сталі, а тепер взагалі всі сталеві листи облицювання покриті цинком. Також передня та задня частина облицювання виготовляються із склопластику.



Рисунок 2.25 – Корозія каркасу моторного відсіку автобуса «Богдан» А092 після п'яти років експлуатації

Однак зовнішнє облицювання при експлуатації до дев'яти років має прояви наскрізної корозії (рис. 2.26).



Рисунок 2.26 – Корозія облицювання автобуса «Богдан» А092 після дев'яти років експлуатації [84]

Стосовно облицювання, на автобусах «Еталон» одне із місць, що схильне до корозії – це фартух над заднім бампером висотою близько 15 см (рис. 2.27).



Рисунок 2.27 – Корозія панелі автобуса «Еталон» над заднім бампером [77]

Взимку там набивається сніг у суміші із соляно-пісчаними засобами проти обмерзання доріг, влітку – бруд, і в цьому місці починає активно розвиватися корозія. В результаті цей елемент облицювання доводиться в процесі експлуатації відновлювати. Попередити такі корозійні руйнування можна додатковим АЗ, однак експлуатуючі організації цим нехтують.

Згодом кришки багажних відділень і двері страждають від корозії, перш за все, в тих місцях, в яких при відкриванні вони спираються на ущільнювачі, з яких спочатку стирається фарба, а потім і гальванічне покриття (рис. 2.28).

Як показує досвід експлуатації автобусів, корозія вищеназваних елементів каркасу кузова проходить із різною інтенсивністю. На деякі незначні прояви корозії експлуатаційники не звертають особливої уваги. Однак при суттєвих корозійних ушкодженнях автобус підлягає частковому, а то і ВР, що, в свою чергу, призводить до простою та значних витрат.



Рисунок 2.28 – Корозія облицювання задніх дверей автобуса «Еталон» [77]

Під час експлуатації автобусів корозія розвивається під дією атмосферного впливу (вологість повітря, вміст солей в атмосфері, кількість опадів, перепади температури). Також інтенсивності корозії сприяє використання соляних сумішей проти обмерзання доріг, що в більшій мірі проявляється у великих містах. У містах із населенням понад 1 млн жителів інтенсивність корозії настільки велика, що автобус стає на ВР кузова вже через

4–5 років експлуатації. При цьому пробіг складає близько 400–500 тис. км, а ресурс двигуна, залежно від режимів експлуатації, знаходиться в межах 800–900 тис. км (при дбалому відношенні пробіги двигуна до ВР досягають 1,2–1,4 млн км). У містах із населенням до 1 млн жителів ВР кузовів автобусів проводиться через 7–9 років при пробігу 0,7–0,9 млн км. При цьому значним ураженням корозією підлягають повздовжні лонжерони каркасу основи в районі задніх арок.

Зменшенню інтенсивності корозії сприяє регламентна обробка внутрішніх порожнин лонжеронів антикорозійними засобами («Мовіль», «Резистин») та своєчасне усунення пошкодження зовнішнього покриття труб каркасу.

Експериментальні дослідження [54] підтверджують погіршення механічних властивостей каркасу кузова в процесі експлуатації під дією корозії та накопичення осередків втомного руйнування. Як показали дослідження [54] у всіх зразках, вирізаних із елементів каркасу кузова автобуса після десяти років експлуатації, спостерігається погіршення механічних властивостей – зменшення границі міцності σ_B на 7–68%. Це підтверджує те, що експлуатація кузова з таким погіршенням механічних властивостей недопустима, оскільки такі матеріали не забезпечують кузову відповідність вимогам ПБ згідно Правил ЄЕК ООН № 66.

Враховуючи досвід експлуатуючих організацій встановлено, що при цілорічній експлуатації автобусів пробіг за 1 рік складає близько 100 тис. км. Таким чином провівши аналіз корозійних процесів кузовів автобусів громадського транспорту від початку експлуатації до десяти років експлуатації, на основі статистичних даних, встановлено наступні закономірності (рис. 2.29). Такі закономірності дозволяють отримати ряд значень, за якими можна отримати математичні залежності розрахунку зменшення товщини елементів каркасу кузова в процесі експлуатації. Тому їх можливо надалі використовувати при комп'ютерному моделюванні довговічності кузова автобуса.

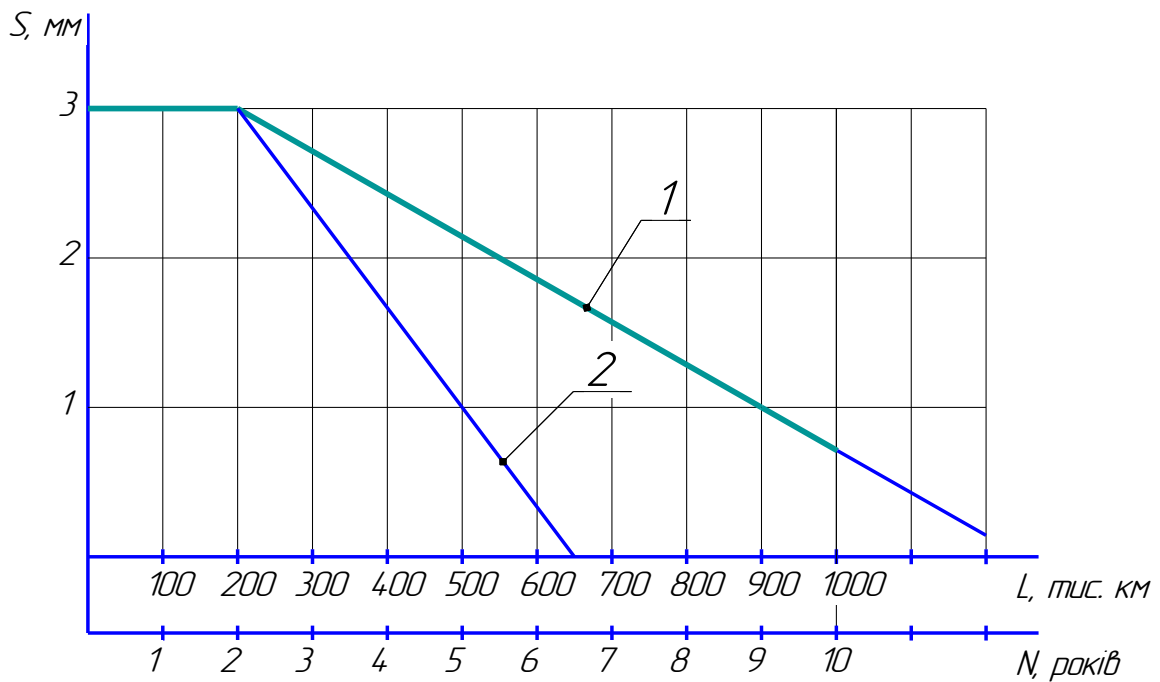


Рисунок 2.29 – Середньостатистична залежність товщини лонжеронів каркасу основи автобуса від терміну експлуатації та пробігу під впливом корозії: 1 – у містах із чисельністю населення до 1 млн жителів; 2 – у містах із чисельністю населення понад 1 млн жителів

Як видно з рис. 2.29 у перші два роки експлуатації корозія лонжеронів практично не виникає, оскільки ще не зношений заводський АЗ. Потім після другого року експлуатації інтенсивність корозії різко зростає та товщина металу лонжеронів зменшується за кожен рік експлуатації по лінійній залежності. З рис. 2.29 видно, що за п'ять років експлуатації у містах із чисельністю населення понад 1 млн жителів товщина лонжеронів каркасу основи в середньому зменшується з 3,0 до 1,0 мм, а у містах із чисельністю населення до 1 млн жителів аналогічна картина спостерігається тільки через дев'ять років.

На основі графічної залежності (рис. 2.29) можна спрогнозувати корозійні процеси каркасу основи автобусів громадського транспорту та передбачити приблизний пробіг автобуса до ВР.

Таким чином, використання середньостатистичної залежності товщини лонжеронів каркасу основи автобуса від терміну експлуатації та пробігу під впливом корозії (рис. 2.29) і отриманих даних у роботі [54] дозволить у подальшому встановити граничні терміни експлуатації автобусів як при руйнуванні каркасу основи, так і на основі невідповідності Правилам ЄЕК ООН № 66.

2.4 Висновки до розділу 2

1. На основі статистичних даних, отриманих від експлуатуючих організацій встановлено, що витрати на експлуатацію автобусів громадського транспорту постійно зростають, за винятком гарантійного періоду (перші 100 тис. км), у зв'язку із зростанням витрат на поточний ремонт.

2. Основне в автобусі, що обмежує його довговічність – це двигун (ресурс близько 1 млн км) та кузов (5–8 років експлуатації, при річному пробігу близько 100 тис. км). Менші терміни експлуатації мають автобуси, що експлуатуються у містах-мільйонниках при постійних перевантаженнях та підвищеною корозією від дії агресивних реагентів проти обмерзання доріг.

3. Під час відновлювальних ремонтів, що проводяться силами експлуатуючої організації вартість відновлення двигуна та кузова практично однакова, однак кількість днів простою під час відновлювального ремонту кузова в п'ять разів вище і є максимальною кількістю днів простою в порівнянні з іншими агрегатами автобуса та сумарний збиток становить 2250–5100 доларів США.

4. Відновлювальний ремонт кузова власними силами експлуатуючої організації продовжує термін експлуатації автобуса лише на 3–4 роки, у зв'язку з частковою заміною елементів кузова, що мають характерні пошкодження.

5. В основному експлуатуючі організації не проводять додатковий антикорозійний захист кузова, тому кузов починає інтенсивно кородувати після спрацювання заводського антикорозійного захисту приблизно через два роки експлуатації. Підвищити ресурс кузова можна своєчасним оновленням

антикорозійного захисту, або вдосконаленням технологій антикорозійного захисту кузова автобуса та впровадженням новітніх матеріалів ще на етапі його проєктування.

6. Для раціонального вдосконалення технологій антикорозійного захисту кузова автобуса та впровадження новітніх матеріалів виникає необхідність у розробці методологій, що дозволять спрогнозувати ресурс кузова ще на стадії проєктування.

7. Враховуючи суттєві пошкодження кузовів автобусів під дією корозії та накопичення осередків втомного руйнування припустимо, що може наступити момент невідповідності автобуса щодо вимог Правил ЄЕК ООН № 66. Тому виникає необхідність у розробці методів по перевірці автобуса на відповідність правилам пасивної безпеки ЄЕК ООН № 66 під час його експлуатації.

РОЗДІЛ 3

ПРОГНОСТИЧНА ОЦІНКА ДОВГОВІЧНОСТІ КУЗОВІВ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Структура і алгоритм комп'ютерного моделювання розрахунку зміни міцності кузова в експлуатації

3.1.1 Методологія прогностичної оцінки ресурсної довговічності автобусів

Визначальним елементом конструкції автобусів, що обумовлює його державну реєстрацію та ідентифікує власне конкретний автобус (так званий VIN-код) є кузов, незалежно від забудови на колісному шасі чи несівного типу (так званий монокок). Двигун та інші агрегати і системи можуть замінюватись (природно на однотипні, згідно технічних умов виробника) і піддаватись ремонту без впливу на ідентифікацію конкретного автобуса як учасника руху – об'єкту пасажирських перевезень. Очевидна майбутня гармонізація нормативної законодавчої бази України у сфері автомобільного транспорту з відповідною базою ЄС обумовить докорінні зміни в існуючому регламенті обов'язкового регулярного технічного контролю автобусів [1] з уведенням звичної для ЄС оцінки критичної міцності (тріщин) несівних елементів кузова, як одного з визначальних чинників ПБ автобуса [65] і, відповідно, проведення відповідального ремонту або списання/утилізації автобуса, заборони його експлуатації на дорогах загального користування. Таким чином уже на ЕП актуальною стає і оцінка довговічності (ресурсу) кузова, що формується втомною міцністю металу несівного каркасу/основи кузова під впливом ациклічних навантажень від нерівностей (мікропрофілю) дороги (з урахуванням представленої функції збурень і характеристик підвіски та шин) та впливу у часі корозії (насамперед із-за використання соляних сумішей у зимову пору року) на відповідне погіршення фізико-механічних характеристик металу труб несівної основи каркасу кузова.

Очевидно, що крім потенційних властивостей кузова, закладених на ЕП і виробництва (матеріали і технології виробництва, адекватність конструкції умовам рівномірності), визначальним у формуванні прогностичної оцінки ресурсу (довговічності) кузова є умови експлуатації (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Структура прогностичної оцінки ресурсу кузова автобуса

Останні формуються трьома основними чинниками, що мають визначальний вплив на залишкову втомну міцність несівної основи каркасу (а, відповідно і на ПБ конструкції загалом) (рис. 3.1) [66]:

– пікові перевантаження (в тому числі ті, що перевищують номінальну пасажиромісткість автобуса), що ще є характерними для умов експлуатації в Україні та СНД;

– аналогічні навантаження від мікропрофілю дороги з урахуванням передавальних (демпфуючих та пружних характеристик шин і підвіски і, власне, з урахуванням реальних характеристик спектральної густини мікропрофілю доріг (включно і вибоїни), а не тільки ідеалізованих характеристик дороги I категорії згідно будівельних норм [85], під які зазвичай іде проєктний розрахунок з умов міцності і ресурсу конструкції);

– погіршення, зниження характеристик міцності металевих труб каркасу кузова у функції часу під впливом як звичної «атмосферної» корозії (в тому числі конденсату у точці роси), так і, особливо, у зимові періоди експлуатації, внаслідок застосування дорожніми службами піщано-соляних сумішей (із відчутною різницею інтенсивності їхнього використання у різних регіонах).

Для прогностичної оцінки ресурсу – втомної міцності несівної основи каркасу кузова автобуса методами комп'ютерного моделювання-розрахунку достатньо обмежитись двомірною еквівалентною схемою (рис. 3.2) з умов певної симетрії процесів у поперечній площині, однак з акцентом на праву боковину кузова автобуса, як більш критичної з умов [86]:

– меншого запасу міцності з-за дверних проїм і дещо більшого пасажиронавантаження для автобусів 1 і 2 класів за рахунок накопичення стоячих пасажирів у проходах у салон у години пік;

– як правило гіршого стану дорожнього покриття ближче до обочин і частішого заїзду правою стороною автобуса на обочини, насамперед на маршрутах місцевого сполучення.

Природно, що конкретна еквівалентна модель автобуса відчутно вирізнятиметься як для кузовів, забудованих на рамних шасі, так і для несівних конструкцій. Останні теж слід розділити з умов прийняття навантажень каркасом на три основні типи:

– класичний (типи kombi, highdecker) з розвинутою просторовою несівною нижньою фермою, що фактично сприймає домінуючу частину навантажень від дороги і пасажиропотоку;

– низькопідлогові конструкції типу «low-floor», де відчутна частина навантажень передається і на несівну верхню ферму (каркас даху) та відповідно навантажені вертикальні зв'язуючі стійки каркасу;

– кузови типу «low-entry» з комбінованою структурою каркасу – частиною салону з низькою підлогою та фрагментом класичної структури каркасу (сюди ж відносяться і схеми каркасу з низькою площадкою у задньому

звисі та каркасу типу kombi з пониженим рівнем підлоги салону при передньомоторній компоновці – типу «Атаман» А092Н6 та інші).



Рисунок 3.2 – Схема прогностичної оцінки ресурсу комп'ютерного розрахунку та використання математичних методів

В основу структури комп'ютерного моделювання-розрахунку покладено суміщення навантажень насамперед у критичних вузлах несівної ферми/основи кузова (як правило у зонах передньої і задньої підвісок) від нерівностей дороги, з одного боку, і пасажиронаповнення салону (очевидно з врахуванням ймовірного розподілу значень обох чинників в експлуатації) з другого (рис. 3.3), при паралельному, послідовному в часі (еквівалентному пробігу) погіршення характеристик міцності труб каркасу під впливом корозії. Таким чином алгоритм оцінки базується на комбінації (суміщенні) для розрахунку напружень у критичних вузлах основи [48] з формуванням навантажень від нерівностей дороги через передатні функції шин/підвіски на базі методів спектрального аналізу запропонованого Силаєвим А. А. [47, 87] і дрейфом у часі зміни фізико-механічних характеристик вузлових з'єднань і труб (лонжеронів) основи під впливом корозії [54].

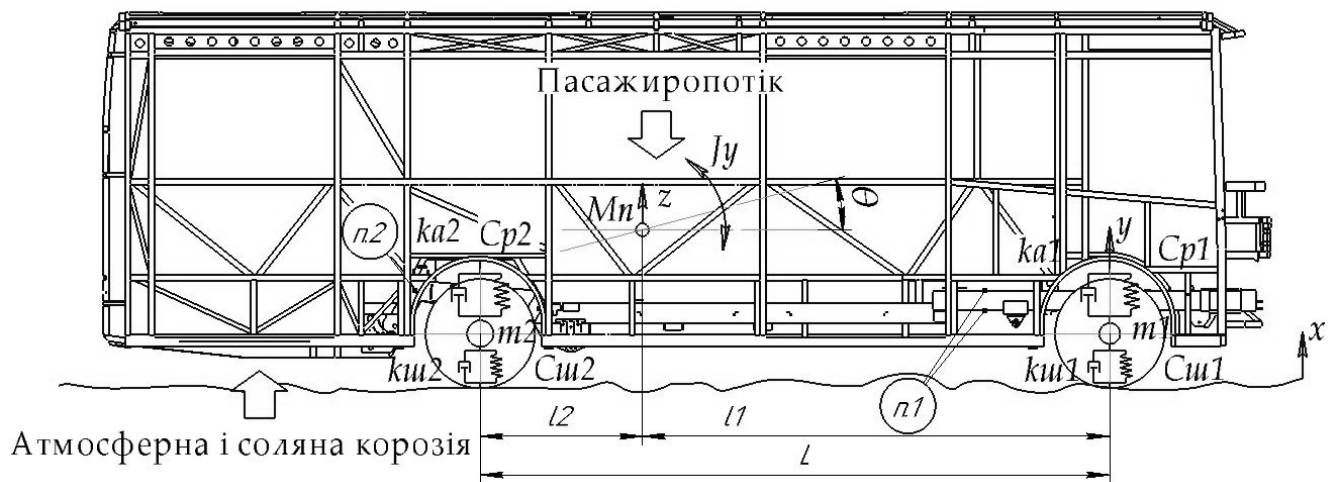


Рисунок 3.3 – Схема прогностичної оцінки ресурсу каркасу кузова автобуса несівної конструкції у зонах передньої і задньої підвісок

Методологія приведення навантажень від мікропрофілю дороги – кореляційна функція висот нерівностей описана Хачатуровим А. А. [47] базується на уже опрацьованих методах стосовно коливань і вібронавантаження колісних машин [70] та реалізується у системі Matlab 2017b [73–75]. Поступова зміна-дрейф фізико-механічних характеристик (міцності) труб каркасу основи прив'язана до тривалості терміну експлуатації (на основі емпіричних залежностей із реальної експлуатації [47, 54]). Природно, що сумарний пробіг і термін експлуатації автобуса є взаємопов'язаними величинами з визначальним коефіцієнтом кореляції. Технічно коректніше у цьому випадку брати пробіг, однак фактично на 3–7 році експлуатації встановити фактичний пробіг автобуса в експлуатації вже доволі складно, насамперед в умовах приватних перевізників, можна тільки отримати орієнтовну, статистичну оцінку середнього пробігу за рік експлуатації (що природно зменшується по мірі старіння автобуса з-за збільшення часу простоїв у поточному ремонті). Окрім цього і відомі дослідження стосовно падіння характеристик міцності сталевих прокату під впливом корозії [47, 54] прив'язані до часу експлуатації. Таким чином слід констатувати необхідність певного припущення щодо ступеня

кореляції ресурсних результатів кузова по часу експлуатації і результуючому пробігу автобуса, що теж підлягають різній квантифікації залежно від класу призначення (intercity – міжміські, local – місцеві і city – міські маршрути) та домінуючого стану дорожнього покриття і інтенсивності використання піщано-соляних сумішей проти обмерзання доріг у різних місцях експлуатації (від максимальної інтенсивності у м. Києві з падінням рівня до мінімального на провінційних місцевих маршрутах).

При визначенні довговічності кузова автобуса на рамному шасі будуть деякі відмінності (рис. 3.4), які отримані на основі вдосконалення методики для кузова несівної конструкції [88].

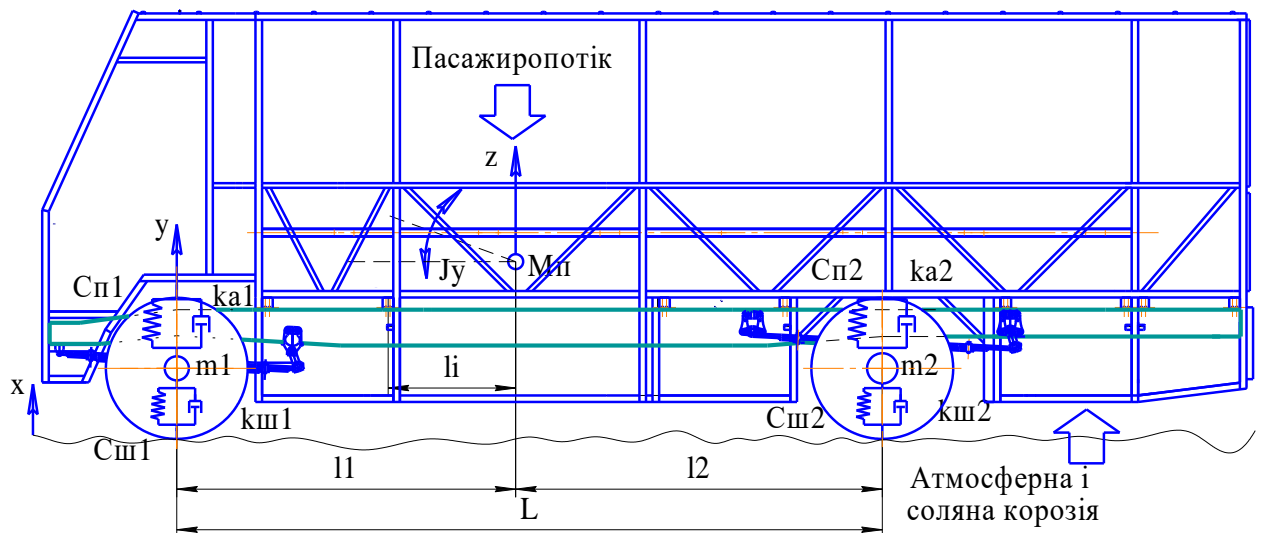


Рисунок 3.4 – Схема оцінки довговічності кузова автобуса на рамному шасі

Для вдосконалення методики, яка передбачає визначення довговічності кузова несівної конструкції [89], враховано особливості конструкції автобуса на рамному шасі. При цьому також важливо визначити довговічність як самої рами, так і кузова, що кріпиться до рами. Для дослідження обирається один із перерізів рами, який, у першу чергу, буде руйнуватись. На відміну від раніше розробленої методики [90], де досліджувався переріз однорідного матеріалу

каркасу основи, дане дослідження передбачає випробування перерізу із двох матеріалів із різними властивостями (рис. 3.5).

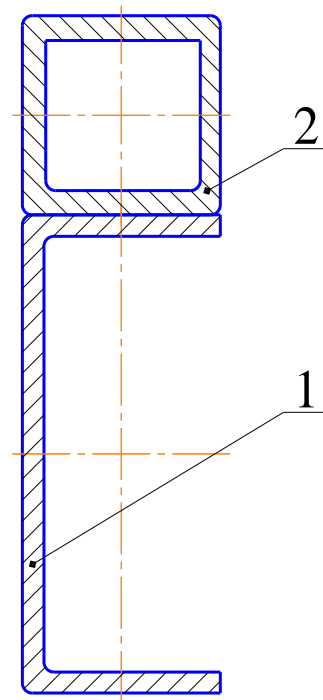


Рисунок 3.5 – Досліджуваний переріз кузова автобуса на рамному шасі:
1– рама; 2 – елемент каркасу кузова

Досліджуваний переріз складається із рами 1, яка виготовляється з легованої сталі та має відкриту конструкцію. Як показує досвід експлуатації автобусів, на відміну від труб закритого типу, рама відкритого типу має вищу корозійну стійкість в 1,5–1,7 рази. Це пояснюється використанням легованої сталі та відкритої конструкції рами, що краще вентилюється та не дозволяє накопичуватись конденсату. Таким чином, досліджуваний переріз під час ІМ розбивається на два елементи: переріз рами 1 та переріз каркасу 2. Як показує реальна експлуатація, спочатку повинен зруйнуватись елемент каркасу кузова, а потім через деякий термін експлуатації руйнується рама. Відповідно на першому етапі моделювання елементи 1 і 2 (рис. 3.5) будуть працювати як одне ціле. Потім після руйнування елемента 2 каркасу кузова дослідження продовжиться тільки з елементом 1.

3.1.2 Передаточні функції від дороги до вертикального переміщення кузова автобуса

3.1.2.1 Вертикальні коливання автобуса

Для дослідження математичної моделі підресореної системи використаємо рівняння Лагранжа другого роду описане Силаєвим А. А. та наведеним у роботі [89]. У цьому випадку на дану динамічну систему, крім збудовуючих і потенційних сил, діють і сили опору, тому рівняння Лагранжа набудуть виду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_k}, \quad (3.1)$$

де $k = 1, 2, \dots, n$;

n – число ступенів свободи динамічної системи;

T – кінетична енергія системи;

Π – потенціальна енергія системи;

Φ – функція розсіювання (функція Релея);

q_k – k -та узагальнена координата.

Ця динамічна система має тільки два ступені свободи, і її положення в просторі визначається двома узагальненими координатами $q_1 = x$ та $q_2 = z$.

Розглянемо вертикальні коливання підресорених мас автобуса M_{II} та непідресорених мас m_1 та m_2 відносно статичної рівноваги

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} (M_{II} \dot{z}^2 + m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2); \\ \Pi &= \frac{1}{2} [c_{II1} (x_1 - z)^2 + c_{II2} (x_2 - z)^2 + c_{III1} (y_1 - x_1)^2 + c_{III2} (y_2 - x_2)^2]; \\ \Phi &= \frac{1}{2} [k_{a1} (\dot{x}_1 - \dot{z})^2 + k_{a2} (\dot{x}_2 - \dot{z})^2 + k_{III1} (\dot{y}_1 - \dot{x}_1)^2 + k_{III2} (\dot{y}_2 - \dot{x}_2)^2] \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Всі три функції (3.2) є знакозмінними додатними квадратичними формами швидкостей та координат вертикальних переміщень коліс автобуса і центру мас кузова. Диференціюючи рівняння (3.2), отримаємо

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_k} \right) = \frac{1}{2} [2m_1 \ddot{x}_1 + 2m_2 \ddot{x}_2] = m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2, \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = \frac{1}{2} M_{\Pi} \cdot 2\ddot{z} = M_{\Pi} \ddot{z}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = \frac{\partial T}{\partial x_2} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial x_k} &= \frac{1}{2} [2c_{m1}(x_1 - z) + 2c_{n2}(x_2 - z) - 2c_{ш1}(y_1 - x_1) - 2c_{ш2}(y_2 - x_2)] =, \\ &= c_{m1}(x_1 - z) + c_{n2}(x_2 - z) - c_{ш1}(y_1 - x_1) - c_{ш2}(y_2 - x_2) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z} = \frac{1}{2} [-2c_{m1}(x_1 - z) - 2c_{n2}(x_2 - z)] = -c_{m1}(x_1 - z) - c_{n2}(x_2 - z), \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_k} &= \frac{1}{2} [2k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z}) + 2k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z}) - 2k_{ш1}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1) - 2k_{ш2}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2)] =, \\ &= k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z}) + k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z}) - k_{ш1}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1) - k_{ш2}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}} = \frac{1}{2} [-2k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z}) - 2k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z})] = -k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z}) - k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z}), \quad (3.9)$$

Підставляємо отримані значення похідних (3.3) – (3.9) у рівняння Лагранжа (3.1)

$$\left. \begin{aligned} M_{II}\ddot{z} - 0 &= -[c_{II1}(x_1 - z) - c_{II2}(x_2 - z)] - [-k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z}) - k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z})]; \\ m_1\ddot{x}_1 - 0 &= -[c_{II1}(x_1 - z) - c_{III1}(y_1 - x_1)] - [k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z}) - k_{III1}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1)]; \\ m_2\ddot{x}_2 - 0 &= -[c_{II2}(x_2 - z) - c_{III2}(y_2 - x_2)] - [k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z}) - k_{III2}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2)]. \end{aligned} \right\}$$

У результаті отримуємо

$$\left. \begin{aligned} M_{II}\ddot{z} + (k_{a1} + k_{a2})\dot{z} + (c_{II1} + c_{II2})z - \\ - c_{II1}x_1 - c_{II2}x_2 - k_{a1}\dot{x}_1 - k_{a2}\dot{x}_2 &= 0; \\ m_1\ddot{x}_1 + (k_{III1} + k_{a1})\dot{x}_1 + (c_{II1} + c_{III1})x_1 - \\ - c_{II1}z - c_{III1}y_1 - k_{a1}\dot{z} - k_{III1}\dot{y}_1 &= 0; \\ m_2\ddot{x}_2 + (k_{III2} + k_{a2})\dot{x}_2 + (c_{II2} + c_{III2})x_2 - \\ - c_{II2}z - c_{III2}y_2 - k_{a2}\dot{z} - k_{III2}\dot{y}_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

При проведенні ІМ у Matlab Simulink система рівнянь (3.10) повинна мати вигляд

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} &= \frac{1}{M_{II}} \left[-(k_{a1} + k_{a2})\dot{z} - (c_{II1} + c_{II2})z + \right. \\ &\quad \left. + k_{a1}\dot{x}_1 + c_{II1}x_1 + k_{a2}\dot{x}_2 + c_{II2}x_2 \right]; \\ \ddot{x}_1 &= \frac{1}{m_1} \left[k_{a1}\dot{z} + c_{II1}z + k_{III1}\dot{y}_1 + c_{III1}y_1 - (k_{III1} + k_{a1})\dot{x}_1 - \right. \\ &\quad \left. - (c_{II1} + c_{III1})x_1 \right]; \\ \ddot{x}_2 &= \frac{1}{m_2} \left[k_{a2}\dot{z} + c_{II2}z + k_{III2}\dot{y}_2 + c_{III2}y_2 - (k_{III2} + k_{a2})\dot{x}_2 - \right. \\ &\quad \left. - (c_{II2} + c_{III2})x_2 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Таким чином, можна реалізувати в Matlab Simulink розв'язання системи рівнянь (3.11) на основі блоків даної прикладної програми (рис. 3.6).

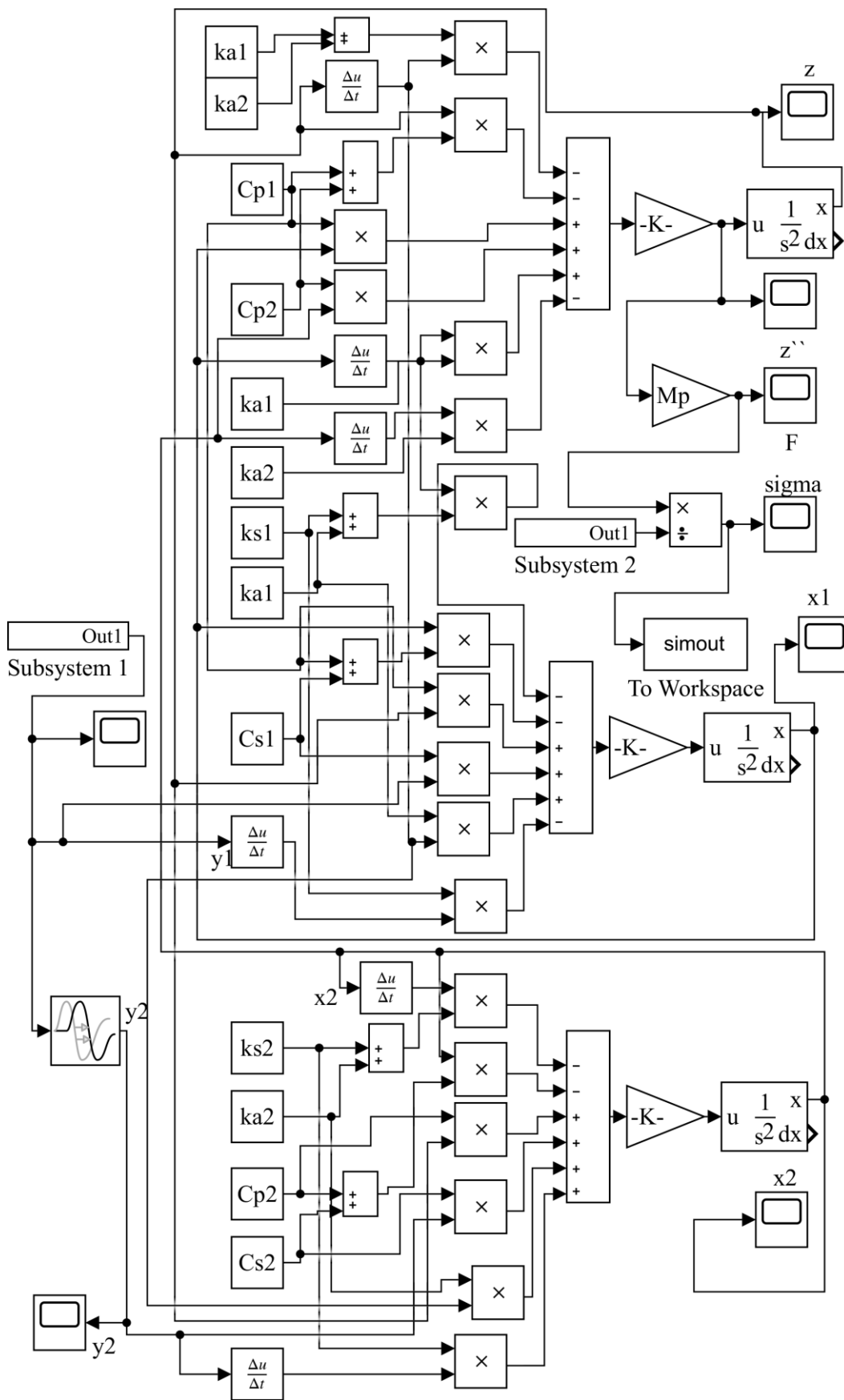


Рисунок 3.6 – Реалізація в Matlab Simulink розв'язання системи рівнянь (3.11)

Таким чином, вертикальні коливання підресореної та не підресорених мас пов'язані. Далі виконаємо перетворення системи (3.11) по Лапласу

$$\left. \begin{aligned} & [M_{II}s^2 + (k_{a1} + k_{a2})s + (c_{II1} + c_{II2})]z(s) - \\ & - (k_{a1}s + c_{II1})x_1(s) - (k_{a2}s + c_{II2})x_2(s) = 0; \\ & [m_1s^2 + (k_{III1} + k_{a1})s + (c_{III1} + c_{III1})]x_1(s) - \\ & - (k_{a1}s + c_{III1})z(s) - (k_{III1}s + c_{III1})y_1(s) = 0; \\ & [m_2s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{III2} + c_{III2})]x_2(s) - \\ & - (k_{a2}s + c_{III2})z(s) - (k_{III2}s + c_{III2})y_2(s) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

де $x_1(s)$, $x_2(s)$, $z(s)$, $y_1(s)$, $y_2(s)$ – лапласові зображення відповідно координат x_1 , x_2 , z , y_1 , y_2 ;

$s = \sigma + i\omega$ – комплексна частота;

ω – колова частота, c^{-1} .

Із системи рівнянь (3.12) можна визначити передаточні функції від дороги до підресореної маси (кузова автобуса).

Для спрощення виведення передаточних функцій доцільно застосувати загальноприйнятій взаємозв'язок, запропонований Ротенбергом Р. В. [46], між впливом мікропрофілю дороги на передні та задні колеса

$$y_2(t) = y_1(t - \tau_3), \quad (3.13)$$

де $\tau_3 = \frac{L}{V_a}$ – час зсуву дії мікропрофілю між передньою та задньою осями.

V_a – швидкість руху автобуса, м/с;

L – колісна база автобуса, м.

Тоді, підставивши у друге та третє рівняння системи (3.12) співвідношення (3.13), проведемо обчислення

$$\begin{aligned}
& [m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1})]x_1(s) - \\
& - (k_{a1}s + c_{п1})z(s) - (k_{ш1} \cdot s + c_{ш1})y_1(s) = 0; \\
& [m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2})]x_2(s) - \\
& - (k_{a2}s + c_{п2})z(s) - (k_{ш2}s + c_{ш2})y_1(s)e^{-\tau s} = 0.
\end{aligned}$$

Виразимо з отриманих рівнянь $y_1(s)$

$$y_1(s) = \frac{[m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1})]x_1(s) - (k_{a1}s + c_{п1})z(s)}{(k_{ш1}s + c_{ш1})};$$

$$y_1(s) = \frac{[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2}) \cdot s + (c_{п2} + c_{ш2})]x_2(s) - (k_{a2}s + c_{п2})z(s)}{(k_{ш2}s + c_{ш2}) \cdot e^{-\tau s}}.$$

Прирівняємо отримані рівняння

$$\begin{aligned}
& \frac{[m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1})]x_1(s) - (k_{a1}s + c_{п1})z(s)}{(k_{ш1}s + c_{ш1})} = \\
& = \frac{[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2})]x_2(s) - (k_{a2}s + c_{п2})z(s)}{(k_{ш2}s + c_{ш2})e^{-\tau s}}.
\end{aligned}$$

Виразимо $x_2(s)$, виконуючи наступні перетворення

$$\begin{aligned}
& ([m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1})]x_1(s) - (k_{a1}s + c_{п1})z(s)) \cdot (k_{ш2}s + c_{ш2})e^{-\tau s} = \\
& = ([m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2})]x_2(s) - (k_{a2}s + c_{п2})z(s)) \cdot (k_{ш1}s + c_{ш1});
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1})] \cdot (k_{ш2}s + c_{ш2})e^{-\tau s} \cdot x_1(s) - \\
& - (k_{a1}s + c_{п1})z(s) \cdot (k_{ш2}s + c_{ш2})e^{-\tau s} = \\
& = [m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2})] \cdot (k_{ш1} \cdot s + c_{ш1})x_2(s) - \\
& - (k_{a2}s + c_{п2})z(s) \cdot (k_{ш1}s + c_{ш1});
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1}) \right] \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} x_1(s) - \\
& - (k_{a1} s + c_{п1}) z(s) \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} + (k_{a2} s + c_{п2}) z(s) \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1}) = \\
& = \left[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2}) \right] \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1}) x_2(s).
\end{aligned}$$

З урахуванням передаточних функцій підвісок між $x_1(s)$, $x_2(s)$, $y_1(s)$ та $y_2(s)$ узагальнену координату переміщення невіднесених мас можна виразити наступним чином

$$\begin{aligned}
x_2(s) = & \frac{\left[m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1}) \right] \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} \cdot x_1(s)}{\left[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2}) \right] \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})} - \\
& - \frac{(k_{a1} s + c_{п1}) z(s) \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} + (k_{a2} s + c_{п2}) z(s) \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})}{\left[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2}) \right] \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})}. \quad (3.14)
\end{aligned}$$

Отримане значення $x_2(s)$ (3.14) підставимо в перше рівняння системи (3.12)

$$\begin{aligned}
& \left[M_{п} s^2 + (k_{a1} + k_{a2})s + (c_{п1} + c_{п2}) \right] z(s) - (k_{a1} s + c_{п1}) x_1(s) - \\
& - (k_{a2} s + c_{п2}) \cdot \frac{\left[m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1}) \right] \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} x_1(s)}{\left[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2}) \right] \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})} + \\
& + (k_{a2} s + c_{п2}) \cdot \frac{(k_{a1} s + c_{п1}) z(s) \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} + (k_{a2} s + c_{п2}) z(s) \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})}{\left[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2}) \right] \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})} = 0.
\end{aligned}$$

З отриманого рівняння, виконавши послідовні перетворення, можна визначити передаточну функцію від дороги до вертикального переміщення піднесеної маси (кузова автобуса)

$$\begin{aligned}
& \left[M_{п} s^2 + (k_{a1} + k_{a2})s + (c_{п1} + c_{п2}) \right] z(s) + \\
& + (k_{a2} s + c_{п2}) \cdot \frac{(k_{a1} s + c_{п1}) \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} + (k_{a2} s + c_{п2}) \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})}{\left[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2}) \right] \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})} \cdot z(s) = \\
& = (k_{a1} s + c_{п1}) x_1(s) + \\
& + (k_{a2} s + c_{п2}) \cdot \frac{\left[m_1 s^2 + (k_{ш1} + k_{a1})s + (c_{п1} + c_{ш1}) \right] \cdot (k_{ш2} s + c_{ш2}) e^{-\tau s} \cdot x_1(s)}{\left[m_2 s^2 + (k_{ш2} + k_{a2})s + (c_{п2} + c_{ш2}) \right] \cdot (k_{ш1} s + c_{ш1})};
\end{aligned}$$

$$\left(\begin{aligned} & M_{II} s^2 + (k_{a1} + k_{a2})s + (c_{II1} + c_{II2}) + \\ & + \frac{(k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{a1}s + c_{II1}) \cdot (k_{III2}s + c_{III2})e^{-\tau s} + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{III1}s + c_{III1})}{[m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})} \end{aligned} \right) z(s) =$$

$$\left((k_{a1}s + c_{II1}) + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot \frac{[m_1 s^2 + (k_{III1} + k_{a1})s + (c_{II1} + c_{III1})] \cdot (k_{III2}s + c_{III2})e^{-\tau s}}{[m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})} \right) x_1(s).$$

Передаточна функція від дороги до вертикального переміщення підресореної маси (кузова автобуса) має вигляд

$$\frac{z(s)}{x_1(s)} = \frac{\left(\begin{aligned} & \frac{(k_{a1}s + c_{II1}) \cdot [m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})}{[m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})} + \\ & + \frac{(k_{a2}s + c_{II2}) \cdot [m_1 s^2 + (k_{III1} + k_{a1})s + (c_{II1} + c_{III1})] \cdot (k_{III2}s + c_{III2})e^{-\tau s}}{[m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & \frac{[M_{II} s^2 + (k_{a1} + k_{a2})s + (c_{II1} + c_{II2})] \cdot [m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})}{[m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})} + \\ & + \frac{(k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{a1}s + c_{II1}) \cdot (k_{III2}s + c_{III2})e^{-\tau s} + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{III1}s + c_{III1})}{[m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1})} \end{aligned} \right)};$$

$$\frac{z(s)}{x_1(s)} = \frac{\left(\begin{aligned} & (k_{a1}s + c_{II1}) \cdot [m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1}) + \\ & + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot [m_1 s^2 + (k_{III1} + k_{a1})s + (c_{II1} + c_{III1})] \cdot (k_{III2}s + c_{III2})e^{-\tau s} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & [M_{II} s^2 + (k_{a1} + k_{a2})s + (c_{II1} + c_{II2})] \cdot [m_2 s^2 + (k_{III2} + k_{a2})s + (c_{II2} + c_{III2})] \cdot (k_{III1}s + c_{III1}) + \\ & + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{a1}s + c_{II1}) \cdot (k_{III2}s + c_{III2})e^{-\tau s} + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{III1}s + c_{III1}) \end{aligned} \right)};$$

$$\frac{z(s)}{x_1(s)} = \frac{\left(\begin{aligned} & (k_{a1}s + c_{II1}) \cdot (m_2 s^2 + k_{III2}s + k_{a2}s + c_{II2} + c_{III2}) \cdot (k_{III1}s + c_{III1}) + \\ & + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (m_1 s^2 + k_{III1}s + k_{a1}s + c_{II1} + c_{III1}) \cdot (k_{III2}s e^{-\tau s} + c_{III2} e^{-\tau s}) \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & [M_{II} s^2 + k_{a1}s + k_{a2}s + c_{II1} + c_{II2}] \cdot [m_2 s^2 + k_{III2}s + k_{a2}s + c_{II2} + c_{III2}] \cdot (k_{III1}s + c_{III1}) + \\ & + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{a1}s + c_{II1}) \cdot (k_{III2}s e^{-\tau s} + c_{III2} e^{-\tau s}) + (k_{a2}s + c_{II2}) \cdot (k_{III1}s + c_{III1}) \end{aligned} \right)};$$

$$\begin{aligned}
\frac{z(s)}{x_1(s)} &= \frac{\left(\begin{aligned} &(m_2 s^3 k_{a1} + k_{w2} s^2 k_{a1} + k_{a2} s^2 k_{a1} + c_{n2} k_{a1} s + c_{w2} k_{a1} s + \\ &+ m_2 s^2 c_{n1} + k_{w2} s c_{n1} + k_{a2} s c_{n1} + c_{n2} c_{n1} + c_{w2} c_{n1}) \cdot (k_{w1} s + c_{w1}) + \\ &+ (m_1 s^3 k_{a2} + k_{w1} s^2 k_{a2} + k_{a1} s^2 k_{a2} + c_{n1} k_{a2} s + c_{w1} k_{a2} s + \\ &+ m_1 s^2 c_{n2} + k_{w1} s c_{n2} + k_{a1} s c_{n2} + c_{n1} c_{n2} + c_{w1} c_{n2}) \cdot (k_{w2} s e^{-\tau s} + c_{w2} e^{-\tau s}) \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &[M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] \times \\ &\times \left[\begin{aligned} &m_2 s^3 \cdot k_{w1} + k_{w2} s^2 k_{w1} + k_{a2} s^2 k_{w1} + c_{n2} k_{w1} s + c_{w2} k_{w1} s + \\ &+ m_2 s^2 c_{w1} + k_{w2} s c_{w1} + k_{a2} s c_{w1} + c_{n2} c_{w1} + c_{w2} c_{w1} \end{aligned} \right] + \\ &+ (k_{a2} s^2 k_{a1} + c_{n2} k_{a1} s + k_{a2} s c_{n1} + c_{n2} c_{n1}) \times \\ &\times (k_{w2} s e^{-\tau s} + c_{w2} e^{-\tau s}) + k_{a2} s^2 k_{w1} + c_{n2} k_{w1} s + k_{a2} s c_{w1} + c_{n2} c_{w1} \end{aligned} \right)}, \\
\frac{z(s)}{x_1(s)} &= \frac{\left(\begin{aligned} &m_2 s^4 k_{a1} k_{w1} + k_{w2} s^3 k_{a1} k_{w1} + k_{a2} s^3 k_{a1} k_{w1} + c_{n2} k_{a1} s^2 k_{w1} + \\ &+ c_{w2} k_{a1} s^2 k_{w1} + m_2 s^3 c_{n1} k_{w1} + k_{w2} s^2 c_{n1} k_{w1} + k_{a2} s^2 c_{n1} k_{w1} + \\ &+ c_{n2} c_{n1} k_{w1} s + c_{w2} c_{n1} k_{w1} s + m_2 s^3 k_{a1} c_{w1} + k_{w2} s^2 k_{a1} c_{w1} + \\ &+ k_{a2} s^2 k_{a1} c_{w1} + c_{n2} k_{a1} s c_{w1} + c_{w2} k_{a1} s c_{w1} + m_2 s^2 c_{n1} c_{w1} + \\ &+ k_{w2} s c_{n1} c_{w1} + k_{a2} s c_{n1} c_{w1} + c_{n2} c_{n1} c_{w1} + c_{w2} c_{n1} c_{w1} + \\ &+ m_1 s^3 k_{a2} k_{w2} s e^{-\tau s} + k_{w1} s^2 k_{a2} k_{w2} s e^{-\tau s} + k_{a1} s^2 k_{a2} k_{w2} s e^{-\tau s} + \\ &+ c_{n1} k_{a2} s k_{w2} s e^{-\tau s} + c_{w1} k_{a2} s k_{w2} s e^{-\tau s} + m_1 s^2 c_{n2} k_{w2} s e^{-\tau s} + \\ &+ k_{w1} s c_{n2} k_{w2} s e^{-\tau s} + k_{a1} s c_{n2} k_{w2} s e^{-\tau s} + c_{n1} c_{n2} k_{w2} s e^{-\tau s} + \\ &+ c_{w1} c_{n2} k_{w2} s e^{-\tau s} + m_1 s^3 k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s} + k_{w1} s^2 k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{a1} s^2 k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{n1} k_{a2} s c_{w2} e^{-\tau s} + c_{w1} k_{a2} s c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ m_1 s^2 c_{n2} c_{w2} e^{-\tau s} + k_{w1} s c_{n2} c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{a1} s c_{n2} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{n1} c_{n2} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{w1} c_{n2} c_{w2} e^{-\tau s} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &[M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] m_2 s^3 k_{w1} + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] k_{w2} s^2 k_{w1} + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] k_{a2} s^2 k_{w1} + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] c_{n2} k_{w1} s + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] c_{w2} k_{w1} s + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] m_2 s^2 c_{w1} + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] k_{w2} s c_{w1} + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] k_{a2} s c_{w1} + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] c_{n2} c_{w1} + \\ &+ [M_{II} s^2 + k_{a1} s + k_{a2} s + c_{n1} + c_{n2}] c_{w2} c_{w1} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &+ k_{a2} s^3 k_{a1} k_{w2} e^{-\tau s} + c_{n2} k_{a1} s^2 k_{w2} e^{-\tau s} + k_{a2} s^2 c_{n1} k_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ c_{n2} c_{n1} k_{w2} s e^{-\tau s} + k_{a2} s^2 k_{a1} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{n2} k_{a1} s c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{a2} s c_{n1} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{n2} c_{n1} c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{a2} s^2 k_{w1} + c_{n2} k_{w1} s + k_{a2} s c_{w1} + c_{n2} c_{w1} \end{aligned} \right)},
\end{aligned}$$

$$\frac{z(s)}{x_1(s)} = \frac{\left(\begin{aligned} & m_2 k_{a_1} k_{w_1} s^4 + k_{w_2} k_{a_1} k_{w_1} s^3 + k_{a_2} k_{a_1} k_{w_1} s^3 + c_{n_2} k_{a_1} k_{w_1} s^2 + \\ & + c_{w_2} k_{a_1} k_{w_1} s^2 + m_2 c_{n_1} k_{w_1} s^3 + k_{w_2} c_{n_1} k_{w_1} s^2 + k_{a_2} c_{n_1} k_{w_1} s^2 + \\ & + c_{n_2} c_{n_1} k_{w_1} s + c_{w_2} c_{n_1} k_{w_1} s + m_2 k_{a_1} c_{w_1} s^3 + k_{w_2} k_{a_1} c_{w_1} s^2 + \\ & + k_{a_2} k_{a_1} c_{w_1} s^2 + c_{n_2} k_{a_1} c_{w_1} s + c_{w_2} k_{a_1} c_{w_1} s + m_2 c_{n_1} c_{w_1} s^2 + \\ & + k_{w_2} c_{n_1} c_{w_1} s + k_{a_2} c_{n_1} c_{w_1} s + c_{n_2} c_{n_1} c_{w_1} + c_{w_2} c_{n_1} c_{w_1} + \\ & + m_1 k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^4 + k_{w_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + k_{a_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + \\ & + c_{n_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + c_{w_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + m_1 c_{n_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + \\ & + k_{w_1} c_{n_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + k_{a_1} c_{n_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + c_{n_1} c_{n_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + c_{w_1} c_{n_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s + m_1 k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + k_{w_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + \\ & + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + c_{n_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + c_{w_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + m_1 c_{n_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + k_{w_1} c_{n_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + k_{a_1} c_{n_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + c_{n_1} c_{n_2} c_{w_2} e^{-\tau s} + c_{w_1} c_{n_2} c_{w_2} e^{-\tau s} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & M_{n_1} m_2 k_{w_1} s^5 + k_{a_1} m_2 k_{w_1} s^4 + k_{a_2} m_2 k_{w_1} s^3 + c_{n_1} m_2 k_{w_1} s^3 + \\ & + c_{n_2} m_2 k_{w_1} s^3 + M_{n_1} k_{w_2} k_{w_1} s^4 + k_{a_1} k_{w_2} k_{w_1} s^3 + k_{a_2} k_{w_2} k_{w_1} s^3 + \\ & + c_{n_1} k_{w_2} k_{w_1} s^2 + c_{n_2} k_{w_2} k_{w_1} s^2 + M_{n_1} k_{a_2} k_{w_1} s^4 + k_{a_1} k_{a_2} k_{w_1} s^3 + \\ & + k_{a_2} k_{a_2} k_{w_1} s^3 + c_{n_1} k_{a_2} k_{w_1} s^2 + c_{n_2} k_{a_2} k_{w_1} s^2 + M_{n_1} c_{n_2} k_{w_1} s^3 + \\ & + k_{a_1} c_{n_2} k_{w_1} s^2 + k_{a_2} c_{n_2} k_{w_1} s^2 + c_{n_1} c_{n_2} k_{w_1} s + c_{n_2} c_{n_2} k_{w_1} s + \\ & + M_{n_1} c_{w_2} k_{w_1} s^3 + k_{a_1} c_{w_2} k_{w_1} s^2 + k_{a_2} c_{w_2} k_{w_1} s^2 + c_{n_1} c_{w_2} k_{w_1} s + \\ & + c_{n_2} c_{w_2} k_{w_1} s + M_{n_1} m_2 c_{w_1} s^4 + k_{a_1} m_2 c_{w_1} s^3 + k_{a_2} m_2 c_{w_1} s^3 + \\ & + c_{n_1} m_2 c_{w_1} s^2 + c_{n_2} m_2 c_{w_1} s^2 + M_{n_1} k_{w_2} c_{w_1} s^3 + k_{a_1} k_{w_2} c_{w_1} s^2 + \\ & + k_{a_2} k_{w_2} c_{w_1} s^2 + c_{n_1} k_{w_2} c_{w_1} s + c_{n_2} k_{w_2} c_{w_1} s + M_{n_1} k_{a_2} c_{w_1} s^3 + \\ & + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_1} s^2 + k_{a_2} k_{a_2} c_{w_1} s^2 + c_{n_1} k_{a_2} c_{w_1} s + c_{n_2} k_{a_2} c_{w_1} s + \\ & + M_{n_1} c_{n_2} c_{w_1} s^2 + k_{a_1} c_{n_2} c_{w_1} s + k_{a_2} c_{n_2} c_{w_1} s + \\ & + c_{n_1} c_{n_2} c_{w_1} + c_{n_2} c_{n_2} c_{w_1} + M_{n_1} c_{w_2} c_{w_1} s^2 + k_{a_1} c_{w_2} c_{w_1} s + k_{a_2} s c_{w_2} c_{w_1} + \\ & + c_{n_1} c_{w_2} c_{w_1} + c_{n_2} c_{w_2} c_{w_1} + k_{a_2} k_{a_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + c_{n_2} k_{a_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + \\ & + k_{a_2} c_{n_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + c_{n_2} c_{n_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s + k_{a_2} k_{a_1} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + \\ & + c_{n_2} k_{a_1} c_{w_2} e^{-\tau s} s + k_{a_2} c_{n_1} c_{w_2} e^{-\tau s} s + c_{n_2} c_{n_1} c_{w_2} e^{-\tau s} + \\ & + k_{a_2} k_{w_1} s^2 + c_{n_2} k_{w_1} s + k_{a_2} c_{w_1} s + c_{n_2} c_{w_1} \end{aligned} \right)};$$

$$\frac{z(s)}{x_1(s)} = \frac{\left(\begin{aligned} & m_2 k_{a_1} k_{w_1} s^4 + m_1 k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^4 + \\ & + k_{w_2} k_{a_1} k_{w_1} s^3 + m_2 c_{\pi_1} k_{w_1} s^3 + k_{a_2} k_{a_1} k_{w_1} s^3 + m_2 k_{a_1} c_{w_1} s^3 + \\ & + k_{w_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + k_{a_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + m_1 c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + \\ & + m_1 k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + \\ & + c_{\pi_2} k_{a_1} k_{w_1} s^2 + c_{w_2} k_{a_1} k_{w_1} s^2 + k_{w_2} c_{\pi_1} k_{w_1} s^2 + k_{a_2} c_{\pi_1} k_{w_1} s^2 + \\ & + k_{w_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + m_1 c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + \\ & + k_{w_2} k_{a_1} c_{w_1} s^2 + k_{a_2} k_{a_1} c_{w_1} s^2 + m_2 c_{\pi_1} c_{w_1} s^2 + c_{\pi_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + \\ & + c_{w_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + k_{w_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + k_{a_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + \\ & + c_{\pi_2} c_{\pi_1} k_{w_1} s + c_{w_2} c_{\pi_1} k_{w_1} s + c_{\pi_2} k_{a_1} c_{w_1} s + c_{w_2} k_{a_1} c_{w_1} s + \\ & + k_{w_2} c_{\pi_1} c_{w_1} s + k_{a_2} c_{\pi_1} c_{w_1} s + c_{\pi_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + c_{w_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau s} s + c_{\pi_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + c_{w_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + k_{w_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + k_{a_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + c_{\pi_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau s} + c_{w_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau s} + c_{\pi_2} c_{\pi_1} c_{w_1} + c_{w_2} c_{\pi_1} c_{w_1} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & M_{\pi} m_2 k_{w_1} s^5 + \\ & + k_{a_1} m_2 k_{w_1} s^4 + M_{\pi} k_{w_2} k_{w_1} s^4 + M_{\pi} k_{a_2} k_{w_1} s^4 + M_{\pi} m_2 c_{w_1} s^4 + \\ & + c_{\pi_1} m_2 k_{w_1} s^3 + c_{\pi_2} m_2 k_{w_1} s^3 + k_{a_1} k_{w_2} k_{w_1} s^3 + k_{a_2} k_{w_2} k_{w_1} s^3 + \\ & + k_{a_1} k_{a_2} k_{w_1} s^3 + k_{a_2} k_{a_2} k_{w_1} s^3 + M_{\pi} c_{\pi_2} k_{w_1} s^3 + M_{\pi} c_{w_2} k_{w_1} s^3 + \\ & + k_{a_1} m_2 c_{w_1} s^3 + k_{a_2} m_2 c_{w_1} s^3 + M_{\pi} k_{w_2} c_{w_1} s^3 + M_{\pi} k_{a_2} c_{w_1} s^3 + \\ & + k_{a_2} k_{a_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s^3 + \\ & + c_{\pi_1} k_{w_2} k_{w_1} s^2 + c_{\pi_2} k_{w_2} k_{w_1} s^2 + c_{\pi_1} k_{a_2} k_{w_1} s^2 + c_{\pi_2} k_{a_2} k_{w_1} s^2 + \\ & + k_{a_1} c_{\pi_2} k_{w_1} s^2 + k_{a_2} c_{\pi_2} k_{w_1} s^2 + k_{a_1} c_{w_2} k_{w_1} s^2 + k_{a_2} c_{w_2} k_{w_1} s^2 + \\ & + c_{\pi_1} m_2 c_{w_1} s^2 + c_{\pi_2} m_2 c_{w_1} s^2 + k_{a_1} k_{w_2} c_{w_1} s^2 + k_{a_2} k_{w_2} c_{w_1} s^2 + \\ & + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_1} s^2 + k_{a_2} k_{a_2} c_{w_1} s^2 + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_1} s^2 + k_{a_2} k_{a_2} c_{w_1} s^2 + \\ & + M_{\pi} c_{\pi_2} c_{w_1} s^2 + M_{\pi} c_{w_2} c_{w_1} s^2 + c_{\pi_2} k_{a_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + \\ & + k_{a_2} c_{\pi_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + k_{a_2} k_{a_1} c_{w_2} e^{-\tau s} s^2 + k_{a_2} k_{w_1} s^2 + \\ & + k_{a_2} m_2 k_{w_1} s + c_{\pi_1} c_{\pi_2} k_{w_1} s + c_{\pi_2} c_{\pi_2} k_{w_1} s + c_{\pi_1} c_{w_2} k_{w_1} s + \\ & + c_{\pi_2} c_{w_2} k_{w_1} s + c_{\pi_1} k_{w_2} c_{w_1} s + c_{\pi_2} k_{w_2} c_{w_1} s + c_{\pi_1} k_{a_2} c_{w_1} s + \\ & + c_{\pi_2} k_{a_2} c_{w_1} s + k_{a_1} c_{\pi_2} c_{w_1} s + k_{a_2} c_{\pi_2} c_{w_1} s + c_{\pi_2} k_{a_1} c_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + k_{a_2} c_{\pi_1} c_{w_2} e^{-\tau s} s + k_{a_1} c_{w_2} c_{w_1} s + k_{a_2} c_{w_2} c_{w_1} s + c_{\pi_2} c_{\pi_1} k_{w_2} e^{-\tau s} s + \\ & + c_{\pi_2} k_{w_1} s + k_{a_2} c_{w_1} s + c_{\pi_1} c_{\pi_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} c_{\pi_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} c_{w_1} + \\ & + c_{\pi_1} c_{w_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} c_{w_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} c_{\pi_1} c_{w_2} e^{-\tau s} \end{aligned} \right)};$$

$$\frac{z(s)}{x_1(s)} = \frac{\left(\begin{aligned} &(m_2 k_{a1} k_{w1} + m_1 k_{a2} k_{w2} e^{-\tau s}) s^4 + \\ &+ (k_{w2} k_{a1} k_{w1} + m_2 c_{\pi 1} k_{w1} + k_{a2} k_{a1} k_{w1} + m_2 k_{a1} c_{w1} + k_{w1} k_{a2} k_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{a1} k_{a2} k_{w2} e^{-\tau s} + m_1 c_{\pi 2} k_{w2} e^{-\tau s} + m_1 k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s}) s^3 + \\ &+ (c_{\pi 2} k_{a1} k_{w1} + c_{w2} k_{a1} k_{w1} + k_{w2} c_{\pi 1} k_{w1} + k_{a2} c_{\pi 1} k_{w1} + c_{w1} k_{a2} k_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{w1} k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s} + k_{a1} k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s} + m_1 c_{\pi 2} c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{w2} k_{a1} c_{w1} + k_{a2} k_{a1} c_{w1} + m_2 c_{\pi 1} c_{w1} + c_{\pi 1} k_{a2} k_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{w1} c_{\pi 2} k_{w2} e^{-\tau s} + k_{a1} c_{\pi 2} k_{w2} e^{-\tau s}) s^2 + \\ &+ (c_{\pi 2} c_{\pi 1} k_{w1} + c_{w2} c_{\pi 1} k_{w1} + c_{\pi 2} k_{a1} c_{w1} + c_{w2} k_{a1} c_{w1} + \\ &+ k_{w2} c_{\pi 1} c_{w1} + k_{a2} c_{\pi 1} c_{w1} + c_{\pi 1} c_{\pi 2} k_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ c_{w1} c_{\pi 2} k_{w2} e^{-\tau s} + c_{\pi 1} k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{w1} k_{a2} c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{w1} c_{\pi 2} c_{w2} e^{-\tau s} + k_{a1} c_{\pi 2} c_{w2} e^{-\tau s}) s + \\ &+ c_{\pi 1} c_{\pi 2} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{w1} c_{\pi 2} c_{w2} e^{-\tau s} + c_{\pi 2} c_{\pi 1} c_{w1} + c_{w2} c_{\pi 1} c_{w1} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &M_{\pi} m_2 k_{w1} s^5 + \\ &+ (k_{a1} m_2 k_{w1} + M_{\pi} k_{w2} k_{w1} + M_{\pi} k_{a2} k_{w1} + M_{\pi} m_2 c_{w1}) s^4 + \\ &+ (c_{\pi 1} m_2 k_{w1} + c_{\pi 2} m_2 k_{w1} + k_{a1} k_{w2} k_{w1} + k_{a2} k_{w2} k_{w1} + \\ &+ k_{a1} k_{a2} k_{w1} + k_{a2} k_{a2} k_{w1} + M_{\pi} c_{\pi 2} k_{w1} + M_{\pi} c_{w2} k_{w1} + k_{a1} m_2 c_{w1} + \\ &+ k_{a2} m_2 c_{w1} + M_{\pi} k_{w2} c_{w1} + M_{\pi} k_{a2} c_{w1} + k_{a2} k_{a1} k_{w2} e^{-\tau s}) s^3 + \\ &+ (c_{\pi 1} k_{w2} k_{w1} + c_{\pi 2} k_{w2} k_{w1} + c_{\pi 1} k_{a2} k_{w1} + c_{\pi 2} k_{a2} k_{w1} + k_{a1} c_{\pi 2} k_{w1} + \\ &+ k_{a2} c_{\pi 2} k_{w1} + k_{a1} c_{w2} k_{w1} + k_{a2} c_{w2} k_{w1} + c_{\pi 1} m_2 c_{w1} + c_{\pi 2} m_2 c_{w1} + \\ &+ k_{a1} k_{w2} c_{w1} + k_{a2} k_{w2} c_{w1} + k_{a1} k_{a2} c_{w1} + k_{a2} k_{a2} c_{w1} + \\ &+ k_{a1} k_{a2} c_{w1} + k_{a2} k_{a2} c_{w1} + M_{\pi} c_{\pi 2} c_{w1} + M_{\pi} c_{w2} c_{w1} + c_{\pi 2} k_{a1} k_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{a2} c_{\pi 1} k_{w2} e^{-\tau s} + k_{a2} k_{a1} c_{w2} e^{-\tau s} + k_{a2} k_{w1}) s^2 + \\ &+ (k_{a2} m_2 k_{w1} + c_{\pi 1} c_{\pi 2} k_{w1} + c_{\pi 2} c_{\pi 2} k_{w1} + c_{\pi 1} c_{w2} k_{w1} + \\ &+ c_{\pi 2} c_{w2} k_{w1} + c_{\pi 1} k_{w2} c_{w1} + c_{\pi 2} k_{w2} c_{w1} + c_{\pi 1} k_{a2} c_{w1} + \\ &+ c_{\pi 2} k_{a2} c_{w1} + k_{a1} c_{\pi 2} c_{w1} + k_{a2} c_{\pi 2} c_{w1} + c_{\pi 2} k_{a1} c_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ k_{a2} c_{\pi 1} c_{w2} e^{-\tau s} + k_{a1} c_{w2} c_{w1} + k_{a2} c_{w2} c_{w1} + c_{\pi 2} c_{\pi 1} k_{w2} e^{-\tau s} + \\ &+ c_{\pi 2} k_{w1} + k_{a2} c_{w1}) s + c_{\pi 1} c_{\pi 2} c_{w1} + c_{\pi 2} c_{\pi 2} c_{w1} + c_{\pi 2} c_{w1} + \\ &+ c_{\pi 1} c_{w2} c_{w1} + c_{\pi 2} c_{w2} c_{w1} + c_{\pi 2} c_{\pi 1} c_{w2} e^{-\tau s} \end{aligned} \right)}.$$

Передаточна функція виражена наступним чином зручна для подальших розрахунків

$$W_z(s) = \frac{z(s)}{x_1(s)} = \frac{As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E}{Fs^5 + Gs^4 + Hs^3 + Ks^2 + Ls + N}, \quad (3.15)$$

де $A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, N$ – узагальнені формули;

$$A = m_2 k_{a_1} k_{w_1} + m_1 k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau S};$$

$$B = k_{w_2} k_{a_1} k_{w_1} + m_2 c_{\pi_1} k_{w_1} + k_{a_2} k_{a_1} k_{w_1} + m_2 k_{a_1} c_{w_1} + k_{w_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + k_{a_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + m_1 c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + m_1 k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau S};$$

$$C = c_{\pi_2} k_{a_1} k_{w_1} + c_{w_2} k_{a_1} k_{w_1} + k_{w_2} c_{\pi_1} k_{w_1} + k_{a_2} c_{\pi_1} k_{w_1} + c_{w_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + k_{w_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + m_1 c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + k_{w_2} k_{a_1} c_{w_1} + k_{a_2} k_{a_1} c_{w_1} + m_2 c_{\pi_1} c_{w_1} + c_{\pi_1} k_{a_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + k_{w_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + k_{a_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau S};$$

$$D = c_{\pi_2} c_{\pi_1} k_{w_1} + c_{w_2} c_{\pi_1} k_{w_1} + c_{\pi_2} k_{a_1} c_{w_1} + c_{w_2} k_{a_1} c_{w_1} + \\ + k_{w_2} c_{\pi_1} c_{w_1} + k_{a_2} c_{\pi_1} c_{w_1} + c_{\pi_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + c_{w_1} c_{\pi_2} k_{w_2} e^{-\tau S} + c_{\pi_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + c_{w_1} k_{a_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + k_{w_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + k_{a_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau S};$$

$$E = c_{\pi_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + c_{w_1} c_{\pi_2} c_{w_2} e^{-\tau S} + c_{\pi_2} c_{\pi_1} c_{w_1} + c_{w_2} c_{\pi_1} c_{w_1};$$

$$F = M_{\pi} m_2 k_{w_1};$$

$$G = k_{a_1} m_2 k_{w_1} + M_{\pi} k_{w_2} k_{w_1} + M_{\pi} k_{a_2} k_{w_1} + M_{\pi} m_2 c_{w_1};$$

$$H = c_{\pi_1} m_2 k_{w_1} + c_{\pi_2} m_2 k_{w_1} + k_{a_1} k_{w_2} k_{w_1} + k_{a_2} k_{w_2} k_{w_1} + \\ + k_{a_1} k_{a_2} k_{w_1} + k_{a_2} k_{a_2} k_{w_1} + M_{\pi} c_{\pi_2} k_{w_1} + M_{\pi} c_{w_2} k_{w_1} + k_{a_1} m_2 c_{w_1} + \\ + k_{a_2} m_2 c_{w_1} + M_{\pi} k_{w_2} c_{w_1} + M_{\pi} k_{a_2} c_{w_1} + k_{a_2} k_{a_1} k_{w_2} e^{-\tau S};$$

$$K = c_{\pi_1} k_{w_2} k_{w_1} + c_{\pi_2} k_{w_2} k_{w_1} + c_{\pi_1} k_{a_2} k_{w_1} + c_{\pi_2} k_{a_2} k_{w_1} + k_{a_1} c_{\pi_2} k_{w_1} + \\ + k_{a_2} c_{\pi_2} k_{w_1} + k_{a_1} c_{w_2} k_{w_1} + k_{a_2} c_{w_2} k_{w_1} + c_{\pi_1} m_2 c_{w_1} + c_{\pi_2} m_2 c_{w_1} + \\ + k_{a_1} k_{w_2} c_{w_1} + k_{a_2} k_{w_2} c_{w_1} + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_1} + k_{a_2} k_{a_2} c_{w_1} + \\ + k_{a_1} k_{a_2} c_{w_1} + k_{a_2} k_{a_2} c_{w_1} + M_{\pi} c_{\pi_2} c_{w_1} + M_{\pi} c_{w_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} k_{a_1} k_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + k_{a_2} c_{\pi_1} k_{w_2} e^{-\tau S} + k_{a_2} k_{a_1} c_{w_2} e^{-\tau S} + k_{a_2} k_{w_1};$$

$$L = k_{a_2} m_2 k_{w_1} + c_{\pi_1} c_{\pi_2} k_{w_1} + c_{\pi_2} c_{\pi_2} k_{w_1} + c_{\pi_1} c_{w_2} k_{w_1} + \\ + c_{\pi_2} c_{w_2} k_{w_1} + c_{\pi_1} k_{w_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} k_{w_2} c_{w_1} + c_{\pi_1} k_{a_2} c_{w_1} + \\ + c_{\pi_2} k_{a_2} c_{w_1} + k_{a_1} c_{\pi_2} c_{w_1} + k_{a_2} c_{\pi_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} k_{a_1} c_{w_2} e^{-\tau S} + \\ + k_{a_2} c_{\pi_1} c_{w_2} e^{-\tau S} + k_{a_1} c_{w_2} c_{w_1} + k_{a_2} c_{w_2} c_{w_1} + c_{\pi_2} c_{\pi_1} k_{w_2} e^{-\tau S} + \\ c_{\pi_2} k_{w_1} + k_{a_2} c_{w_1};$$

$$N = c_{\pi 1} c_{\pi 2} c_{\pi 1} + c_{\pi 2} c_{\pi 2} c_{\pi 1} + c_{\pi 2} c_{\pi 1} + \\ + c_{\pi 1} c_{\pi 2} c_{\pi 1} + c_{\pi 2} c_{\pi 2} c_{\pi 1} + c_{\pi 2} c_{\pi 1} c_{\pi 2} e^{-\tau s}.$$

Важливим показником, що визначає динамічний стан кузова, є прискорення \ddot{z} , яке визначає і динамічні навантаження на КК. Такі циклічні навантаження мають безпосередній вплив на накопичення осередків втомного руйнування в елементах каркасу кузова. Тому потрібно визначити передаточну функцію від мікропрофілю дороги до прискорення кузова

$$W_{\ddot{z}}(s) = s^2 W_z(s) = \frac{(As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E)s^2}{Fs^5 + Gs^4 + Hs^3 + Ks^2 + Ls + N}. \quad (3.16)$$

Підставивши у формулу (3.16) значення $s = i\omega$, отримаємо амплітудно-фазову частотну характеристику прискорення підресореної маси (кузова автобуса)

$$W_{\ddot{z}}(s) = \frac{(A \cdot (i\omega)^4 + B \cdot (i\omega)^3 + C \cdot (i\omega)^2 + D \cdot (i\omega) + E) \cdot (i\omega)^2}{F \cdot (i\omega)^5 + G \cdot (i\omega)^4 + H \cdot (i\omega)^3 + K \cdot (i\omega)^2 + L \cdot (i\omega) + N}; \quad (3.17)$$

$$W_{\ddot{z}}(s) = \frac{(-A\omega^4 + Bi\omega^3 + C\omega^2 - Di\omega - E)\omega^2}{-Fi\omega^5 + G\omega^4 - Hi\omega^3 - K\omega^2 + Li\omega + N};$$

$$W_{\ddot{z}}(s) = \frac{-A\omega^6 + Bi\omega^5 + C\omega^4 - Di\omega^3 - E\omega^2}{-Fi\omega^5 + G\omega^4 - Hi\omega^3 - K\omega^2 + Li\omega + N};$$

$$W_{\ddot{z}}(s) = \frac{(C\omega^2 - A\omega^4 - E)\omega^2 + (B\omega^2 - D)i\omega^3}{(G\omega^4 - K\omega^2 + N) + (L - F\omega^4 - H\omega^2)i\omega}. \quad (3.18)$$

Для визначення зусиль F , що спричинені вертикальними переміщеннями кузова, скористаємося другим законом Ньютона

$$F = M_{II} W_{\dot{z}}(s). \quad (3.19)$$

Важливим параметром при дослідженні накопичення втомної міцності елементів каркасу кузова є напруження σ , які визначаються за формулою

$$\sigma = \frac{F}{S_{III}}, \quad (3.20)$$

де S_{III} – площа поперечного перерізу елементів каркасу кузова, що відповідає M_{II} , м².

Таким чином, визначимо з формул (3.19) – (3.20) напруження σ у загальному вигляді

$$\sigma = \frac{M_{II} W_{\dot{z}}(s)}{S_{III}}. \quad (3.21)$$

Звідки напруження σ визначається за формулою

$$\sigma = \frac{M_{II}}{S_{III}} \cdot \frac{(C\omega^2 - A\omega^4 - E)\omega^2 + (B\omega^2 - D)i\omega^3}{(G\omega^4 - K\omega^2 + N) + (L - F\omega^4 - H\omega^2)i\omega}. \quad (3.22)$$

Згідно формули (3.22) можна визначити спектральні густини та кореляційні функції напружень σ від вертикальних переміщень кузова автобуса, які спричиняють нерівності доріг (мікропрофіль доріг) у центрі підресорених мас M_{II} .

Для визначення напружень σ_i в будь-яких заданих перерізах каркасу кузова автобуса необхідно виконати приведення маси та самої передаточної функції відносно центру мас M_{II} .

3.1.2.2 Вертикальні переміщення у поєднанні з поздовжньо-кутовими коливаннями автобуса

В підрозділі 3.1.2.1 було розглянуто вертикальні коливання автобуса, що дає змогу досліджувати тільки вертикальні переміщення центру мас автобуса та визначати зусилля в центрі мас. Для визначення коливань, зусиль та напружень в будь-яких точках каркасу кузова слід враховувати поздовжньо-кутові коливання.

Розглянемо вертикальні та поздовжньо-кутові коливання підресорених мас автобуса M_{II} та непідресорених мас m_1 та m_2 відносно статичної рівноваги

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} (M_{II} \dot{z}^2 + J_y \dot{\Theta}^2 + m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2); \\ \Pi &= \frac{1}{2} \left[c_{ш1} (y_1 - x_1)^2 + c_{ш2} (y_2 - x_2)^2 + c_{п1} (x_1 - z - \Theta l_1)^2 + \right. \\ &\quad \left. + c_{п2} (x_2 - z + \Theta l_2)^2 \right]; \\ \Phi &= \frac{1}{2} \left[k_{ш1} (\dot{y}_1 - \dot{x}_1)^2 + k_{ш2} (\dot{y}_2 - \dot{x}_2)^2 + k_{a1} (\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta} l_1)^2 + \right. \\ &\quad \left. + k_{a2} (\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta} l_2)^2 \right], \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

де l_1 та l_2 – відстань від вертикальної осі центру мас автобуса до вертикальної осі переднього та заднього колеса відповідно; $L = l_1 + l_2$;

J_y – момент інерції підресореної маси автобуса, що здійснює поздовжньо-кутові коливання;

Θ – кут, на який відхиляється автобус від горизонтальної осі під час поздовжньо-кутових коливань.

Усі три функції (3.23) є знакозмінними додатними квадратичними формами швидкостей, координат вертикальних переміщень коліс автобуса, вертикальних переміщень та поздовжньо-кутових коливань кузова автобуса.

Диференціюючи рівняння (3.23), отримаємо

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_k} \right) = \frac{1}{2} [2m_1 \ddot{x}_1 + 2m_2 \ddot{x}_2] = m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2, \quad (3.24)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = \frac{1}{2} M_{II} \cdot 2\ddot{z} = M_{II} \ddot{z}, \quad (3.25)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\Theta}} \right) = \frac{1}{2} J_y \cdot 2\ddot{\Theta} = J_y \ddot{\Theta}, \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = \frac{\partial T}{\partial x_2} = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial \Theta} = 0, \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial x_k} &= \frac{1}{2} \left[-2c_{III1}(y_1 - x_1) - 2c_{III2}(y_2 - x_2) + 2c_{II1}(x_1 - z - \Theta l_1) + \right. \\ &\quad \left. + 2c_{II2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] = \\ &= -c_{III1}(y_1 - x_1) - c_{III2}(y_2 - x_2) + c_{II1}(x_1 - z - \Theta l_1) + c_{II2}(x_2 - z + \Theta l_2), \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left[-2c_{II1}(x_1 - z - \Theta l_1) - 2c_{II2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] =, \\ &= -c_{II1}(x_1 - z - \Theta l_1) - c_{II2}(x_2 - z + \Theta l_2) \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial \Theta} &= \frac{1}{2} \left[-2c_{II1}l_1(x_1 - z - \Theta l_1) + 2c_{II2}l_2(x_2 - z + \Theta l_2) \right] =, \\ &= -c_{II1}l_1(x_1 - z - \Theta l_1) + c_{II2}l_2(x_2 - z + \Theta l_2) \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_k} &= \frac{1}{2} \left[-2k_{III1}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1) - 2k_{III2}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2) + \right. \\ &\quad \left. + 2k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + 2k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \right] = \\ &= -k_{III1}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1) - k_{III2}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2) + \\ &\quad + k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \end{aligned}, \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}} &= \frac{1}{2} \left[-2k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) - 2k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \right] =, \\ &= k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) - k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\Theta}} &= \frac{1}{2} \left[-2k_{a1}l_1(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + \right. \\ &\quad \left. + 2k_{a2}l_2(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \right] = \\ &= -k_{a1}l_1(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + k_{a2}l_2(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Підставляємо отримані значення похідних (3.24) – (3.33) у рівняння Лагранжа (3.1)

$$\left. \begin{aligned} M_{II} \ddot{z} - 0 &= - \left[-c_{II1}(x_1 - z - \Theta l_1) - c_{II2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] - \\ &- \left[-k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) - k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \right]; \\ J_y \ddot{\Theta} - 0 &= - \left[-c_{II1}l_1(x_1 - z - \Theta l_1) + c_{II2}l_2(x_2 - z + \Theta l_2) \right] - \\ &- \left[-k_{a1}l_1(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) + k_{a2}l_2(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \right]; \\ m_1 \ddot{x}_1 - 0 &= - \left[-c_{III1}(y_1 - x_1) + c_{III1}(x_1 - z - \Theta l_1) \right] - \\ &- \left[-k_{III1}(\dot{y}_1 - \dot{x}_1) + k_{a1}(\dot{x}_1 - \dot{z} - \dot{\Theta}l_1) \right]; \\ m_2 \ddot{x}_2 - 0 &= - \left[-c_{III2}(y_2 - x_2) + c_{III2}(x_2 - z + \Theta l_2) \right] - \\ &- \left[-k_{III2}(\dot{y}_2 - \dot{x}_2) + k_{a2}(\dot{x}_2 - \dot{z} + \dot{\Theta}l_2) \right]; \end{aligned} \right\}$$

У результаті отримаємо

$$\left. \begin{aligned} M_{II} \ddot{z} &= -(k_{a1} + k_{a2})\dot{z} - (c_{II1} + c_{II2})z + (-k_{a1}l_1 + k_{a2}l_2)\dot{\Theta} + \\ &+ (-c_{II1}l_1 + c_{II2}l_2)\Theta + k_{a1}\dot{x}_1 + c_{III1}x_1 + k_{a2}\dot{x}_2 + c_{III2}x_2; \\ J_y \ddot{\Theta} &= (-k_{a1}l_1 + k_{a2}l_2)\dot{z} + (-c_{II1}l_1 + c_{II2}l_2)z - \\ &- (k_{a1}l_1^2 + k_{a2}l_2^2)\dot{\Theta} - (c_{II1}l_1^2 + c_{II2}l_2^2)\Theta + k_{a1}l_1\dot{x}_1 + \\ &+ c_{III1}l_1x_1 - k_{a2}l_2\dot{x}_2 - c_{III2}l_2x_2; \\ m_1 \ddot{x}_1 &= k_{a1}\dot{z} + c_{III1}z + k_{III1}\dot{y}_1 + c_{III1}y_1 - (k_{III1} + k_{a1})\dot{x}_1 - \\ &- (c_{III1} + c_{III1})x_1 + (k_{a1}\dot{\Theta} + c_{III1}\Theta)l_1; \\ m_2 \ddot{x}_2 &= k_{a2}\dot{z} + c_{III2}z + k_{III2}\dot{y}_2 + c_{III2}y_2 - (k_{III2} + k_{a2})\dot{x}_2 - \\ &- (c_{III2} + c_{III2})x_2 - (k_{a2}\dot{\Theta} + c_{III2}\Theta)l_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Для побудови імітаційної моделі в Matlab Simulink приведемо систему рівнянь (3.34) до виду

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} &= \frac{1}{M_{II}} \left[\begin{array}{l} -(k_{a1} + k_{a2})\dot{z} - (c_{II1} + c_{II2})z + \\ + k_{a1}\dot{x}_1 + c_{II1}x_1 + k_{a2}\dot{x}_2 + c_{II2}x_2 + \\ + (k_{a2}l_2 - k_{a1}l_1)\dot{\Theta} + (c_{II2}l_2 - c_{II1}l_1)\Theta \end{array} \right]; \\ \ddot{\Theta} &= \frac{1}{J_y} \left[\begin{array}{l} (k_{a2}l_2 - k_{a1}l_1)\dot{z} + (c_{II2}l_2 - c_{II1}l_1)z - \\ - (k_{a1}l_1^2 + k_{a2}l_2^2)\dot{\Theta} - (c_{II1}l_1^2 + c_{II2}l_2^2)\Theta + k_{a1}l_1\dot{x}_1 + \\ + c_{II1}l_1x_1 - k_{a2}l_2\dot{x}_2 - c_{II2}l_2x_2 \end{array} \right]; \\ \ddot{x}_1 &= \frac{1}{m_1} \left[\begin{array}{l} k_{a1}\dot{z} + c_{II1}z + k_{ш1}\dot{y}_1 + c_{ш1}y_1 - (k_{ш1} + k_{a1})\dot{x}_1 - \\ - (c_{ш1} + c_{II1})x_1 + (k_{a1}\dot{\Theta} + c_{II1}\Theta)l_1 \end{array} \right]; \\ \ddot{x}_2 &= \frac{1}{m_2} \left[\begin{array}{l} k_{a2}\dot{z} + c_{II2}z + k_{ш2}\dot{y}_2 + c_{ш2}y_2 - (k_{ш2} + k_{a2})\dot{x}_2 - \\ - (c_{ш2} + c_{II2})x_2 - (k_{a2}\dot{\Theta} + c_{II2}\Theta)l_2 \end{array} \right]; \end{aligned} \right\} (3.35)$$

3.1.2.3 Моделювання пробою підвісок під час експлуатації автобуса

У реальних умовах експлуатації, враховуючи якість дорожнього покриття, неминуче виникають пробой підвісок автобуса. Пробой підвіски супроводжується контактом відбійників із відповідними елементами підвіски. Зокрема, у автобусах «Атаман» А092Н6 пробой передньої підвіски супроводжується контактом із відбійником, а задня підвіска пробиває при контакті буферів відбою всередині пневмобалону. При пробой підвіски вона починає працювати як одне ціле із підресореною масою кузова та не виконує свою функцію. Таким чином, знакозмінні навантаження від мікропрофілю дороги будуть передаватись із урахуванням тільки поглинання енергії шинами, безпосередньо до підресореної маси кузова автобуса. Коли підвіска (непідресорена маса) працює як одне ціле із кузовом (підресореною масою), коефіцієнт жорсткості c_{II} набуває максимального значення та прямує до нескінченності [90].

Для пробою підвіски необхідно, щоб добуток прискорення непідресореної маси на саму непідресорену масу (зусилля в напрямку кузова,

спричинене нерівностями мікропрофілю дороги) в сумі з навантаженням розподіленої підресореної маси на дану невідресорену масу (навантаження підресореної маси автобуса з пасажирами, що стискає пружні елементи підвіски) був рівним або більшим за силу пружності підвіски (добуток коефіцієнта жорсткості c_{Π_i} і переміщення до пробою підвіски).

Пробій підвіски можна записати наступним чином

$$\text{за умови } m_i \ddot{x}_i + M_{\Pi_i} \geq F_{\Pi_i}, \quad c_{\Pi_i} = c_{\Pi_{Pr_i}} \rightarrow \infty; \quad (3.36)$$

$$\text{за умови } m_i \ddot{x}_i + M_{\Pi_i} < F_{\Pi_i}, \quad c_{\Pi_i} = c_{\Pi_i},$$

де $m_i \ddot{x}_i$ – зусилля в напрямку кузова, спричинене нерівностями мікропрофілю дороги через i -ту підвіску;

M_{Π_i} – навантаження підресореної маси автобуса з пасажирами, що стискає пружні елементи i -тої підвіски; ($M_{\Pi} = M_{\Pi_1} + M_{\Pi_2}$);

F_{Π_i} – сила пружності i -тої підвіски;

$$F_{\Pi_i} = c_{\Pi_i} x_{\Pi_i};$$

$F_{\Pi_1} = c_{\Pi_1} x_{\Pi_1}$ – сила пружності передньої підвіски;

$F_{\Pi_2} = c_{\Pi_{Pec}} x_{\Pi_2} + F_{\Pi_{Бал}}$ – сила пружності задньої підвіски (з ресорами та пневмобалонами);

$c_{\Pi_{Pec}}$ – коефіцієнт жорсткості задніх ресор;

$F_{\Pi_{Бал}}$ – максимальна сила пружності пневмобалона; $F_{\Pi_{Бал}} = 35$ кН (для автобуса «Атаман» А092Н6);

$c_{\Pi_{Pr_i}}$ – коефіцієнт жорсткості i -тої підвіски при пробойі;

x_{Π_i} – переміщення підвіски до пробою; $x_{\Pi_1} = 65$ мм – передньої підвіски (для автобуса «Атаман» А092Н6);

$x_{\Pi_2} = 80$ мм – задньої підвіски (для автобуса «Атаман» А092Н6).

Умова (3.36) реалізується в програмному середовищі Matlab Simulink наступним чином. Створюється підсистема (Subsystem) та у ній на основі блоків бібліотеки Simulink розв'язується даний алгоритм. Всі потрібні змінні для розрахунку прописуються в робочій області Matlab а також беруться з розрахунку системи рівнянь (3.35). Для прикладу на рис. 3.7 зображено реалізацію алгоритму пробою передньої підвіски.

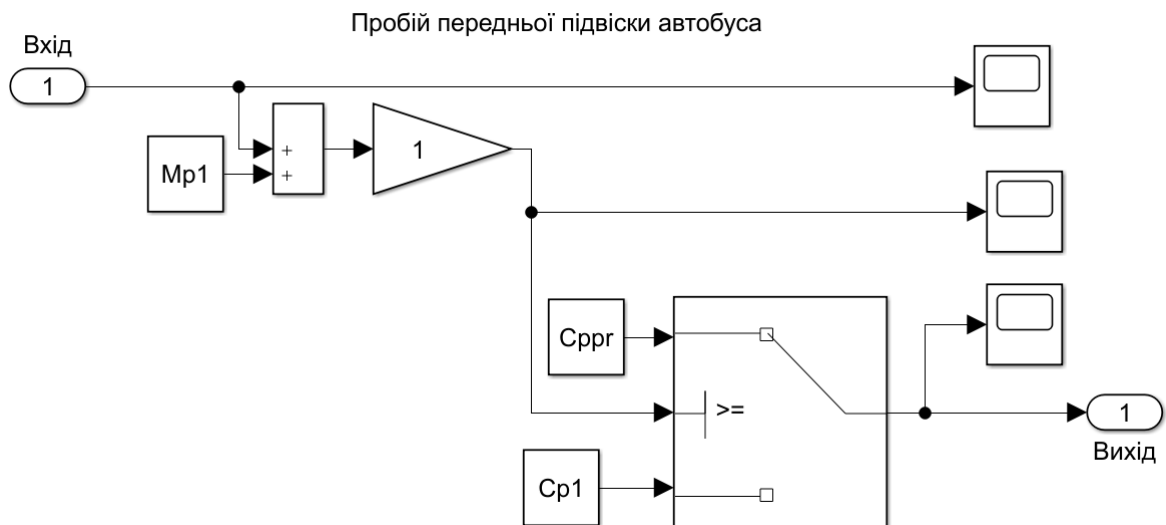


Рисунок 3.7 – Схема реалізації алгоритму пробою передньої підвіски в програмному середовищі Matlab Simulink

На «Вхід» (рис. 3.7) надходять розраховані зусилля в напрямку кузова, спричинені нерівностями мікропрофілю дороги через передню підвіску $m_i \ddot{x}_i$. З «Виходу» виходять значення коефіцієнтів жорсткості підвіски до розрахункових рівнянь (3.35), що і реалізує нормальну роботу підвіски (при подачі $c_{п_i} = c_{п_i}$) чи пробої при перевантаженнях та руху автобуса по дорогах низької якості (при подачі $c_{п_i} = c_{ппр_i} \rightarrow \infty$).

3.1.3 Спектральні густини та кореляційні функції мікропрофілю доріг

Вхідними параметрами при визначенні напружень у елементах каркасу кузова автобуса є параметри мікропрофілю доріг x_1 та x_2 [91]. Ці параметри

задаються у вигляді послідовних дискретних значень ординат спектральної густини мікропрофілю для ряду фіксованих значень частот. Відповідно використовується масив значень попередньо обчислених функцій спектральних густин досліджуваних доріг або проводиться їх розрахунок застосуванням апроксимованих залежностей [92].

При прогнозуванні ресурсу кузова автобуса слід враховувати реалії експлуатації на дорогах будь-якої якості. А саме: дороги із цементно-бетонним покриттям, асфальтним покриттям, бруківкою задовільної якості та бруківкою із впадинами та горбами.

Ряд досліджень було проведено в лабораторії підвіски фахівцями НАМІ Певзнером Я. М. та Тихоновим А. А. по вимірюванню мікропрофілю основних типів автомобільних доріг з різним покриттям [90]. При цьому було поставлено мету встановити межі вимірювання статистичних характеристик для розрахунку коливань автомобіля. Методика досліджень та розрахунків розроблена Певзнером Я. М. та Тихоновим А. А., результати яких наведено в роботі [90].

Отримані експериментальним шляхом кореляційні функції дорожнього мікропрофілю апроксимуються виразами виду [90]

$$\rho(l) = A_1 e^{-\alpha_1 |l|} + A_2 e^{-\alpha_2 |l|} \cos \beta_1 \cdot l; \quad (3.37)$$

$$\rho(l) = e^{-\alpha |l|}, \quad (3.38)$$

де $\rho(l)$ – нормована кореляційна функція мікропрофілю, для неї $A_1 + A_2 = 1$;

α_i – коефіцієнти, що характеризують затухання;

β_1 – коефіцієнт, що характеризує коливальний процес.

В результаті аналізу кореляційних функцій дорожнього мікропрофілю фахівцями НАМІ отримано усереднені розрахункові аналітичні вирази

нормованих кореляційних функцій мікропрофілів досліджених типів автомобільних доріг (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Нормовані кореляційні функцій мікропрофілів автомобільних доріг [90]

Тип дорожнього покриття	Розрахункове рівняння
Цементно-бетонне покриття	$\rho(l) = e^{-0,15 l }$
Асфальтне покриття	$\rho(l) = 0,85e^{-0,2 l } + 0,15e^{-0,05 l } \cos 0,6l$
Бруківка задовільної якості	$\rho(l) = e^{-0,45 l }$
Бруківка із впадинами та горбами	$\rho(l) = 0,85e^{-0,5 l } + 0,15e^{-0,2 l } \cos 2l$

Для визначення спектральної густини впливу $S(\omega)$, що є вхідною величиною до передаточної функції від дороги до кузова автобуса, потрібно перейти від кореляційної функції мікропрофілю $\rho(l)$ до кореляційної функції впливу мікропрофілю на автобус (вплив на шини автобуса) $\rho(\tau)$.

Відповідно проміжок часу впливу мікропрофілю дороги на автобус визначається за співвідношенням

$$\tau = \frac{l}{V_a}, \quad (3.39)$$

де l – відрізок шляху, м.

Таким чином можна перейти від аргументу l до аргументу τ . При швидкості $V_a = 1$ м/с коефіцієнти α_i та β_1 у виразах (3.37), (3.38) залишаються без змін у відповідних рівняннях нормованої кореляційної функції дії мікропрофілю на автобус.

Для будь-якої швидкості $V_a \neq 1$ м/с співвідношення матимуть вигляд

$$\alpha = \alpha_1 V_a;$$

$$\alpha' = \alpha_2 V_a;$$

$$\alpha'' = \alpha V_a;$$

$$\beta = \beta_1 V_a.$$

Відповідно вирази нормованих кореляційних функцій дії мікропрофілю на основі виразів (3.37), (3.38) набудуть вигляду

$$\rho(\tau) = A_1 e^{-\alpha|\tau|} + A_2 e^{-\alpha'|\tau|} \cos \beta \cdot \tau; \quad (3.40)$$

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha'|\tau|}. \quad (3.41)$$

Зв'язок між кореляційною функцією та спектральною густиною встановлюється за допомогою косинус-перетворення Фур'є

$$S^*(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \rho(\tau) \cos \omega \cdot \tau d\tau, \quad (3.42)$$

де $S^*(\omega) = \frac{S(\omega)}{D_x}$ – нормована спектральна густина.

Використовуючи дане співвідношення, можна отримати рівняння для обчислення $S^*(\omega)$, що відповідають формулам (3.37), (3.38)

$$S^*(\omega) = \frac{A_1 \alpha}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega^2 + \alpha^2} + \frac{A_2 \alpha'}{\pi} \cdot \frac{\omega^2 + \alpha'^2 + \beta^2}{(\omega^2 + \alpha'^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha'^2 \beta^2}; \quad (3.43)$$

$$S^*(\omega) = \frac{\alpha''}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega^2 + \alpha''^2} \quad (3.44)$$

Використовуючи співвідношення наведені в табл. 3.1, а також формули (3.40) – (3.44), отримані Певзнером Я. М. та Тихоновим А. А. розрахункові рівняння нормованих спектральних густин дії мікропрофілів автомобільних доріг [90], що використовуються під час моделювання (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Розрахункові рівняння нормованих спектральних густин дії мікропрофілів автомобільних доріг [91]

Тип дорожнього покриття	Розрахункове рівняння
Цементно-бетонне покриття	$S^*(\omega) = \frac{0,048V_a}{\omega^2 + 0,0225V_a^2}$
Асфальтне покриття	$S^*(\omega) = \frac{0,054V_a}{\omega^2 + 0,04V_a^2} + \frac{0,0024V_a(\omega^2 + 0,36V_a^2)}{(\omega^2 - 0,36V_a^2)^2 + 0,0036V_a^4}$
Бруківка задовільної якості	$S^*(\omega) = \frac{0,143V_a}{\omega^2 + 0,2V_a^2}$
Бруківка із впадинами та горбами	$S^*(\omega) = \frac{0,135V_a}{\omega^2 + 0,25V_a^2} + \frac{0,0096V_a \cdot (\omega^2 + 4,04V_a^2)}{(\omega^2 - 3,96V_a^2)^2 + 0,64V_a^4}$

Для отримання змінних у часі числових значень мікропрофілю автомобільних доріг за відомими кореляційними функціями чи спектральними густинами існує ряд методів. У роботі Шалигана А. С. та Палагіна Ю. І. описані прикладні методи статистичного моделювання, що реалізовані в роботі [90], де описаний метод формуючого фільтра. Формуючий фільтр – це динамічна система, яка перетворює випадковий процес виду білого шуму у випадковий процес із заданими статистичними характеристиками. Такий метод нескладно застосувати при ІМ в Matlab Simulink. Результати роботи Белецького А. В., де застосовано метод формуючого фільтра, проведено комп'ютерне моделювання в програмному середовищі Delphi Pascal та отримано адекватні результати також реалізовано в роботі [90]. Такий метод формуючого фільтра було

використано Бровциним В. Н. і при моделюванні мікропрофілю поверхні полів та доріг у середовищі Matlab Simulink, що дало результати із заданою точністю [90].

Залежність, яка дозволяє розрахувати поточні випадкові значення мікропрофілю дороги та отримана методом формуючого фільтра Бровциним В. Н., має вигляд [90]

$$x(t) = \zeta(t) \cdot \left[\frac{A_1 \sqrt{2\sigma_x^2 \alpha_1 / h}}{s + \alpha_1} + \frac{A_2 \sqrt{2\sigma_x^2 \alpha_2 / h} s + A_2 \sqrt{2\sigma_x^2 \alpha_2 / h} \cdot \sqrt{\alpha_2^2 + \beta_2^2}}{s^2 + 2\alpha_2 s + \alpha_2^2 + \beta_2^2} \right], \quad (3.45)$$

де $\zeta(t)$ – дискретний білий шум;

h – крок інтегрування;

s – оператор диференціювання.

В табл. 3.3 наведено коефіцієнти апроксимації автокореляційних функцій автомобільних доріг, отриманих дослідниками: Певзнером Я. М., Тихоновим А. А., Бровциним В. Н., Белецьким А. В. по яких можуть рухатись автобуси при перевезенні пасажирів [90].

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти апроксимації автокореляційних функцій автомобільних доріг, по яким можуть рухатись автобуси при перевезенні пасажирів [90]

Тип дорожнього покриття	σ_x , см	A_1 , 1/м	A_2 , 1/м	α_1 , 1/м	α_2 , 1/м	β , 1/м
Цементно-бетонне покриття	0,5-1,24	-	-	-0,15	-	-
Асфальтне покриття	0,8-1,26	0,85	0,15	-0,2	-0,05	0,6
Бруківка задовільної якості	1,35-3,28	-	-	0,45	-	-
Бруківка із впадинами та горбами	1,35-3,28	0,85	0,15	-0,5	-0,2	1

Залежність (3.45) досить зручна для реалізації у Matlab Simulink. Числові значення коефіцієнтів апроксимації (табл. 3.3) записуються до робочої області Matlab, а розрахунки виконуються при IM Simulink. Дискретний білий шум задається блоком генерації білого шуму із бібліотеки Matlab Simulink.

Спираючись на залежність (3.45), в Matlab Simulink реалізовано наступну підсистему [93] (рис. 3.8).

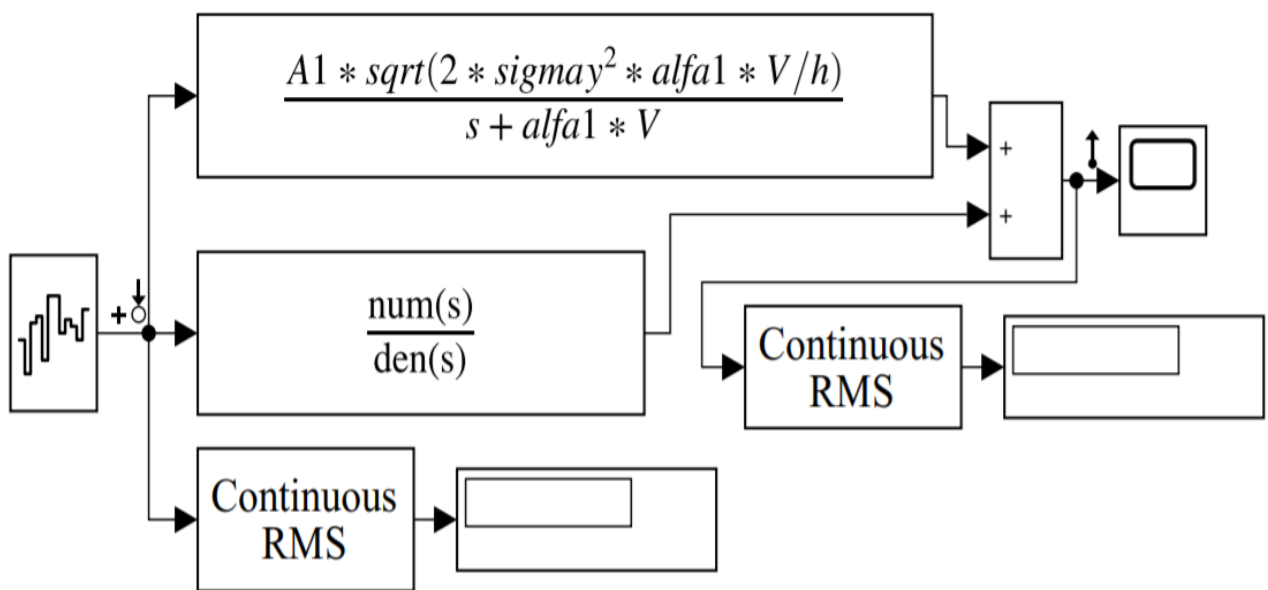


Рисунок 3.8 – Підсистема розрахунку значень мікропрофілю дороги за функцією часу [90]

Крім цього розроблена модель передбачає обробку конкретних числових даних, отриманих під час дослідження поверхні дорожнього полотна. Такі значення можна внести до робочої області у вигляді матриці та за допомогою функції виклику подати на вхід системи конкретні значення мікропрофілю дороги.

Оператор диференціювання реалізується блоком передатної функції із бібліотеки Matlab Simulink.

3.1.4 Накопичення осередків втомного руйнування в елементах каркасу кузова автобуса під час експлуатації

3.1.4.1 Розрахунок функцій розподілу амплітуд напружень за методом максимумів

Прийнято вважати, що найкращі результати для оцінки довговічності дає метод повних циклів [94, 95]. Однак у ряді випадків, наприклад на ЕП, коли відсутні осцилограми навантаження, але відома спектральна густина і кореляційні функції випадкового процесу зміни напружень. Такий варіант найбільш прийнятний у даному випадку при прогнозуванні ресурсу кузова автобуса на ЕП. Таким чином, розрахунок функцій розподілу амплітуд напружень може бути виконаний по методу максимумів із використанням формули Райса С. для розподілу максимумів нормального випадкового процесу [96].

Згідно формули Райса С. середнє число перетинів нульового рівня N_0 та середнє число максимумів N_1 можна визначити

$$N_0 = \frac{1}{\pi} I_{\eta}^{\frac{1}{2}}; \quad (3.46)$$

$$N_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_{\xi}}{I_{\eta}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (3.47)$$

$$I_{\eta} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S^*(\omega) d\omega, \quad (3.48)$$

$$I_{\xi} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^4 S^*(\omega) d\omega. \quad (3.49)$$

Оскільки КК автобуса виготовляється зі Сталі 10, а каркас основи зі Сталі 20 то важливо знати характеристики опору втомної міцності цих металів за довідниковими даними [94] в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Характеристики опору втомлюваності Сталі 10 та Сталі 20 [94]

Матеріал	f , Гц	R_σ	σ_m, τ_m , МПа	N_σ , цикл	σ_R, τ_R , МПа	N_G , цикл	m_N
Сталь 10	50	-1	0	10^8	169	$5 \cdot 10^6$	14,2
Сталь 20	50	-1	0	10^7	210	$3 \cdot 10^6$	12,2

Відповідно в табл. 3.4:

f – частота циклів при випробуваннях (відношення числа циклів напружень до інтервалу часу їх дії);

R_σ – коефіцієнт асиметрії циклу напружень (відношення мінімального напруження циклу до максимального)

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; \quad (3.50)$$

σ_m, τ_m – середнє напруження циклу (постійна (додатна або від'ємна) складова циклу напружень)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\max}}{2}; \quad (3.51)$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{\min} + \tau_{\max}}{2}, \quad (3.52)$$

де N_σ – базове число циклів (максимальна кількість циклів напружень, які обмежують тривалість випробувань зразків без руйнування);

σ_R, τ_R – межа витривалості (максимальна амплітуда напружень, при якій ще не відбувається втомне руйнування до бази випробувань);

N_G – абсциса точки перелому кривої втомлюваності (кількість циклів, що відповідає точці перелому кривої втомлюваності, представлена двома прямими лініями);

m_N – показник нахилу кривої втомлюваності (якщо крива втомлюваності побудована в подвійних логарифмічних координатах)

$$m_N = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg \sigma_2 - \lg \sigma_1}. \quad (3.53)$$

Тут (σ_1, N_1) та (σ_2, N_2) визначають координати двох точок на лівій гілці кривої втомлюваності.

Таким чином для Сталі 10 та Сталі 20 можна побудувати криві втомлюваності в багатоцикловій області в подвійних логарифмічних координатах (рис. 3.9).

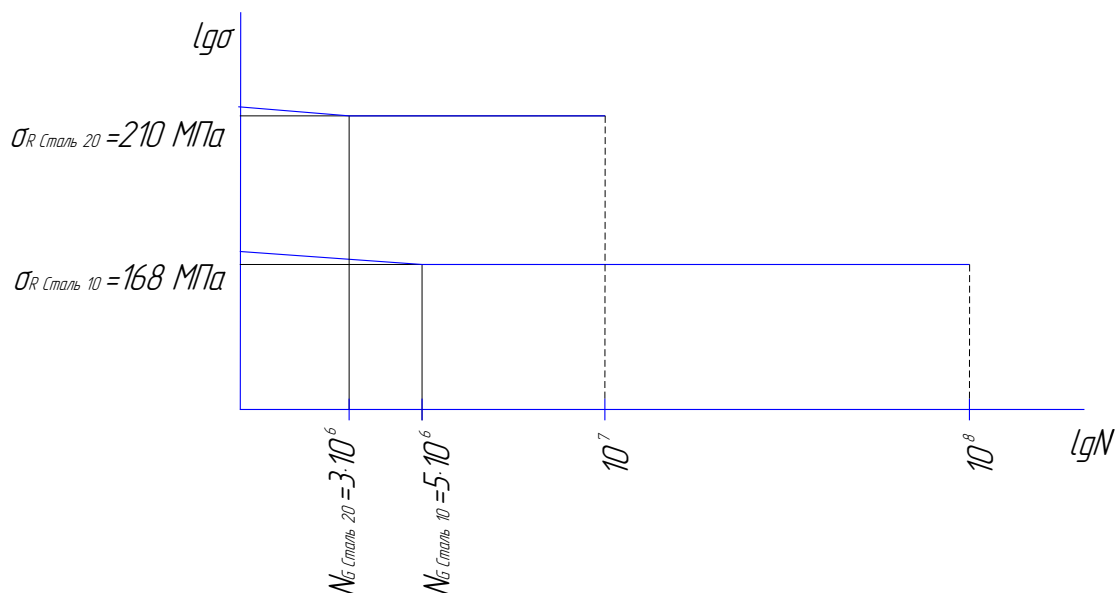


Рисунок 3.9 – Криві втомлюваності в багатоцикловій області побудовані в подвійних логарифмічних координатах для Сталі 10 та Сталі 20

Згідно [94] циклічна довговічність (число циклів напружень, витриманих навантаженим елементом каркасу кузова до утворення втомної тріщини або до втомного руйнування) визначається за формулою

$$N = \begin{cases} \frac{\sigma_R^{m_N} N_G}{\sigma^{m_N}}, & \sigma \geq \sigma_R \\ \infty, & \sigma < \sigma_R \end{cases}, \quad (3.54)$$

де σ – напруження (приймається σ_a або σ_{\max});

σ_a – амплітуда напруження циклу (найбільше числове додатне значення змінної складової циклу напружень)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (3.55)$$

Також існує можливість розрахунку довговічності, яка описана в роботі Гольда Б. В., Оболенського Е. П., Стефановича Ю. Г. та Трофімова О. Ф. [94]. Авторами [94] сказано: якщо прийняти запас втомної міцності рівним одиниці, то загальна кількість циклів всіх напружень u_Σ до руйнування визначається за формулою

$$u_\Sigma = \frac{\tau_{rd}^q}{\int \tau_{if}^q(\tau_i) d} \quad (3.56)$$

Однак у реальних умовах експлуатації елементи каркасу кузова підлягають складним режимам навантаження, коли послідовність значень амплітуд і середніх напружень циклу змінюються випадковим чином (випадкове навантаження). Тому такий варіант дослідження може бути використаний при наближених розрахунках довговічності.

3.1.4.2 Розрахунок довговічності кузова автобуса при випадковому навантаженні

При випадковому навантаженні сумарне число циклів до руйнування залежить від характеру навантаження:

- максимальні значення напружень;
- відсоток максимальних навантажень у сумарній кількості циклів навантажень;
- середнє напруження циклу;
- частота навантаження;
- послідовність високих та низьких напружень.

Такі умови викликали необхідність у розробці методів випробувань на витривалість матеріалів та деталей машин у лабораторних умовах із відтворенням основних особливостей випадкового навантаження і створення розрахункових методів [94]. Такі методи дозволяють за результатами випробувань при регулярних навантаженнях (табл. 3.4), (рис. 3.9) оцінювати міцність при випадковому навантаженні.

Для стаціонарного випадкового процесу запропоновано Райхером В. Л. гіпотезу додавання втомних пошкоджень при циклічному навантаженні, яка базується на додаванні енергій коливань на окремих частотах, що дозволяє визначати РКА [90].

Згідно гіпотези Райхера В. Л., використаної у роботі [90], довговічність в одиницях часу визначається за формулою

$$t = \frac{2\pi A}{\Delta^{m_N} \cdot (\sqrt{2})^{m_N} \cdot \Gamma\left(\frac{m_N + 2}{2}\right) \cdot \left(\int_{\omega} S_0(\omega) \omega^{\frac{2}{m_N}} d\omega\right)^{\frac{m_N}{2}}}, \quad (3.57)$$

де $\Delta = \sqrt{D}$ – стандартне відхилення поточних значень напружень;

D – дисперсія;

$S_0(\omega) = \frac{S(\omega)}{D}$ – приведена спектральна густина;

$\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)$ – гамма-функція;

A і m_N – характеристики кривої витривалості ($A = N\sigma_a^{m_N}$).

Довговічність в одиницях пробігу визначається за формулою

$$S = V_a t . \quad (3.58)$$

Таким чином, довговічність каркасу кузова автобуса визначається початком руйнування каркасу основи автобуса у проблемних місцях. Проблемні місця проявляються під час експлуатації на реальних маршрутах, при дослідженнях деформацій елементів каркасу кузова під час дорожніх випробувань та ще на ЕП.

Адекватність розробленої моделі (детально описано у розділі 4) підтверджено на основі порівняння з реальними умовами експлуатації автобуса «Атаман» А092Н6 по дорогах низької якості (бруківка із впадинами та горбами) при максимально допустимій швидкості 50 км/год [76], при повному завантаженні (в реальній експлуатації, в години пік, перевозилось до 80 пасажирів) [89]. На автобусах, що експлуатуються в жорстких умовах, втомні тріщини каркасу основи утворюються при пробігах у межах від 190 до 220 тис. км (на рис. 3.3, п. 2 показано місце утворення втомної тріщини). Наприклад: на одному із автобусів «Атаман» А092Н6, що експлуатується в м. Київ, втомна тріщина утворилась при пробігу 210039 км. Під час моделювання при відповідних вхідних параметрах пробіг склав 218523 км. Таким чином було підтверджено адекватність розробленої моделі. Дана модель працездатна і може бути використана при подальших дослідженнях.

Для визначення довговічності кузова автобуса згідно гіпотези Райхера В. Л. [90] у результаті розв'язання системи рівнянь (3.35) при ІМ в

Matlab Simulink будуть отримані значення переміщень z центру підресорених мас автобуса M_{Π} [93]. Також будуть отримані значення кутів положення кузова при поздовжньо-кутових коливаннях Θ .

Потім визначається сумарне переміщення перерізу, що досліджується

$$z_{\Sigma} = z + l_i \sin \Theta, \quad (3.59)$$

де l_i – відстань від центру мас автобуса до перерізу, що досліджується.

Знайшовши похідну другого порядку від виразу (3.59) в Matlab Simulink отримаємо прискорення досліджуваного перерізу \ddot{z}_{Σ} .

Для визначення зусиль F , що спричинені вертикальними переміщеннями кузова в досліджуваному перерізі, скористаємося другим законом Ньютона

$$F_i = M_{\Pi_i} \ddot{z}_{\Sigma}. \quad (3.60)$$

Важливим параметром при дослідженні накопичення втомної міцності елементів каркасу кузова є напруження σ_i , які визначаються за формулою

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_{\Pi_i}}, \quad (3.61)$$

де S_{Π_i} – площа поперечного перерізу елементів каркасу кузова, що відповідає масі M_{Π_i} , м².

Для визначення напружень σ_i у будь-яких заданих перерізах каркасу кузова автобуса необхідно виконати приведення підресореної маси M_{Π} відносно центру мас до величини маси в перерізі, що досліджується M_{Π_i} .

Площа поперечного перерізу S_{Π_i} досліджуваних лонжеронів буде зменшуватись під дією корозії за рахунок зменшення товщини.

3.1.5 Протікання атмосферно-кліматичної корозії

При наявності корозійних середовищ опір втомному руйнуванню різко зменшується. При циклічному навантаженні в корозійному середовищі поверхня металу вкривається сіткою тріщин, які є результатом вибіркової корозії по місцях різних включень, що взаємодіють з корозійним середовищем [94]. Авторами: Гольдом Б. В., Оболенським Е. П., Стефановичом Ю. Г. та Трофімовим О. Ф., сказано, що при руйнуванні корозією поверхневого шару різко зменшуються позитивні властивості наклепу [94].

Як показано на рис. 2.29. на інтенсивність корозії впливає місто, де експлуатуються автобуси. У містах із чисельністю населення понад 1 млн жителів (наприклад м. Київ) інтенсивність корозії протікає приблизно в два рази швидше, ніж у містах з чисельністю населення до 1 млн жителів (наприклад м. Черкаси).

На основі рис. 2.29 отримаємо аналітичну залежність зміни товщини лонжеронів каркасу основи автобуса від терміну експлуатації та пробігу під впливом корозії

$$S_I = S_{нов} \text{ при } L \leq 100 \text{ тис. км або } N \leq 2 \text{ роки;} \quad (3.62)$$

$$S_{II} = k_{L_i} L + b_{L_i} \text{ або } S_{II} = k_{N_i} N + b_{N_i} \quad (3.63)$$

при $L > 100$ тис. км або $N > 2$ років,

де $S_{нов}$ – початкова товщина труб каркасу; для труб $140 \times 60 \times 3$ мм лонжеронів основи каркасу кузова $S_{нов} = 3$ мм;

L – пробіг автобуса, км;

N – термін експлуатації автобуса, років;

k_{L_i} , b_{L_i} – коефіцієнти при визначенні товщини труб каркасу залежно від пробігу;

k_{N_i} , b_{N_i} – коефіцієнти при визначенні товщини труб каркасу залежно від терміну експлуатації;

i – індекс, що означає кількість населення у місті; 1 – до 1 млн жителів; 2 – понад 1 млн жителів.

В табл. 3.5 наведено коефіцієнти залежності (3.63).

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти залежності (3.63)

К-ть населення	До 1 млн жителів				Більше 1 млн жителів			
	k_{L_1}	b_{L_1}	k_{N_1}	b_{N_1}	k_{L_2}	b_{L_2}	k_{N_2}	b_{N_2}
Позначення коефіцієнтів								
Числові значення	$-2,856 \times 10^{-6}$	3,57	-0,2856	3,57	$-6,662 \times 10^{-6}$	4,33	-0,6662	4,33

В табл. 3.5 наведено коефіцієнти математичних залежностей, які дозволяють проводити розрахунок зменшення товщини труб каркасу основи, (наслідки від зменшення товщини стінок під дією корозії було наведено на рис. 2.16).

3.2 Оцінка впливу конструкційних матеріалів і технологій виробництва на експлуатаційну довговічність

3.2.1 Прогнозування довговічності лонжеронів каркасу основи автобуса експрес-методом у проблемних місцях

КК автобуса під час експлуатації підлягає постійним знакозмінним навантаженням. При проектуванні кузова враховуються навантаження від максимальної маси із коефіцієнтом запасу міцності 1,7. Однак у результаті експлуатації по дорогах низької якості з постійними перевантаженнями (в

годину пік кількість пасажирів сягає восьмидесяти, при пасажиромісткості 52 пасажирів) та із підвищеними швидкостями по цих дорогах неминуча поява тріщин каркасу кузова. Як показує досвід експлуатації, руйнування елементів каркасу кузова відбувається здебільшого в одних і тих же самих місцях. На рис. 3.10 зображені місця елементів каркасу кузова, в яких утворюються тріщини під час перевезення пасажирів з недотриманням нормальних умов експлуатації.

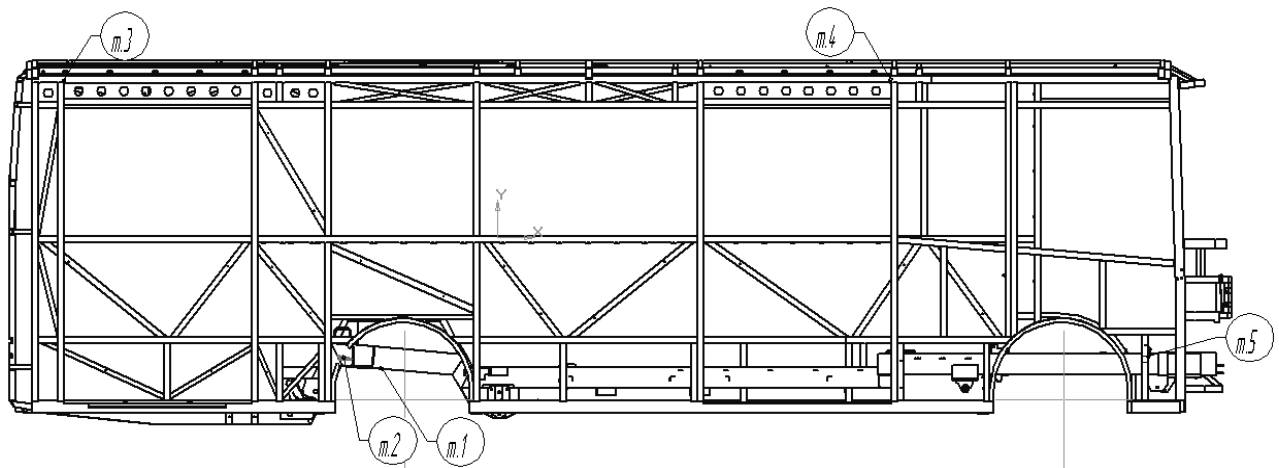


Рисунок 3.10 – Місця пошкодження каркасу кузова автобуса

На рис. 3.10 (т.1) показане місце тріщини каркасу основи поблизу опорної площадки пневморесори. На рис. 2.17 зображено фрагмент труби каркасу основи перерізом $140 \times 60 \times 3,6$ мм, на якому утворилась втомна тріщина (рис. 3.10, т.1) у поєднанні із структурною корозією при пробігу близько 700 тис. км та терміном експлуатації до восьми років.

Такі тріщини (рис. 2.17) систематично виникають при термінах експлуатації 5–9 років, при пробігах 500–900 тис. км навіть при нормальних умовах експлуатації. Такі втомні тріщини виникають у поєднанні із структурною корозією. Як показують неодноразові розтини внутрішньої порожнини труби у місці тріщини розвиток корозії сконцентований навколо

тріщини, на відстані 5–10 мм. Далі поза п'яти – десяти міліметровою зоною прояви корозії менш виражені.

На рис. 3.11 зображено втомну тріщину під дією систематичних перевантажень та руху по дорогах низької якості (рис. 3.10, т.2), при пробігу 210 тис. км та близько двох років експлуатації.

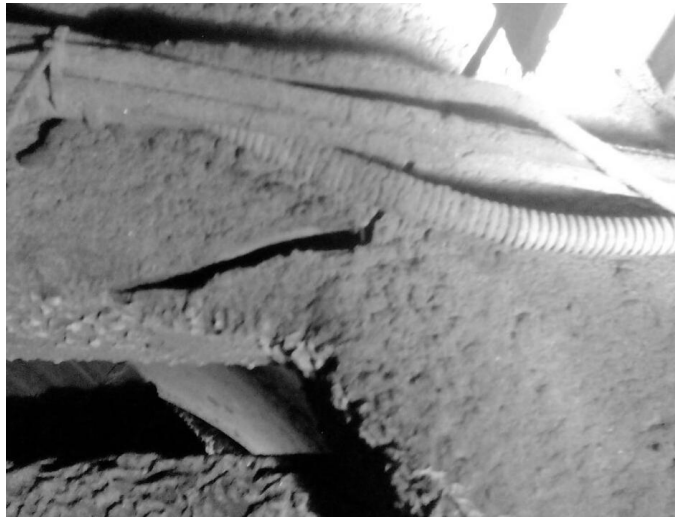


Рисунок 3.11 – Втомна тріщина каркасу основи за опорною площадкою пневморесори

Тріщина (рис. 3.11) утворена тільки під дією знакозмінних циклічних навантажень, оскільки до двох років експлуатації ще діє заводський АЗ закритих порожнин і корозійні процеси зведені до мінімуму.

Каркас правої боковини послаблений проймами пасажирських дверей, тому при частих перевантаженнях, русі по бруківці неминуча поява тріщин даху. Місця тріщин даху показані на рис. 3.10 т. 3 та т. 4. На рис. 2.3 показаний дефект даху (тріщина) навпроти пройми задніх дверей. На рис. 2.4 – дефект даху (тріщина) навпроти пройми передніх дверей. Такі тріщини (рис. 2.3, 2.4) також пов'язані з уведенням підлоги низького входу в задньому звисі та використання широких пройм пасажирських дверей. Тому в такому випадку слід звернути на підсилення каркасу даху, що і було зроблено у відділі головного конструктора АТ «Черкаський автобус».

На рис. 3.10 (т. 5) показане місце дефекту з'єднання каркасу основи з правою боковиною (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Місце руйнування з'єднання каркасу основи з правою боковиною під дією магістральної втомної тріщини та корозії: *а)* – загальний вигляд; *б)* – місце тріщини (збільшено)

Розглянуті дефекти на рис. 2.3, 2.4, 2.17, 3.10–3.12 при експлуатації на дорогах I–III категорій, без перевантаження не виникають. Дефект (рис. 2.17) може виникати при будь-яких умовах експлуатації і чим гірші умови, тим дефект наступить раніше.

Таким чином, для дослідження обрано елементи каркасу основи в області кріплення пневморесори (рис. 2.17) та місце з'єднання каркасу основи з правою боковиною (рис. 3.12), що дозволить виявити кількість циклів при конкретному еквівалентному навантаженні.

Прогнозування довговічності обраних елементів проводилось у середовищі SolidWorks 2018 [71, 97]. Труби каркасу основи перерізом 140×60×3,6 мм виготовляються зі Сталі S355J2G3 (це аналог Сталі 20) іноземного виробництва. Параметри цієї сталі, в тому числі й дані для

дослідження втомної міцності, містяться в бібліотеці SolidWorks. Під час моделювання було задано максимально наближений цикл, якому відповідає віднульове навантаження величиною 5000 Н на відстані 500 мм від краю площадки пневморесори (рис. 3.13).

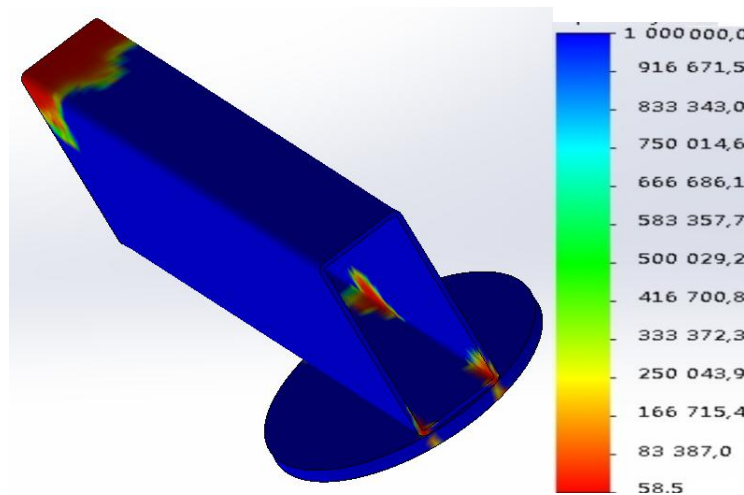


Рисунок 3.13 – Елемент каркасу основи в області кріплення пневморесори, що взятий для моделювання

В результаті моделювання експрес-методом встановлено, що початок утворення втомної тріщини настає при 59 циклах однієї серії віднульового навантаження і відповідає близько 200 тис. км реальної експлуатації при середньому навантаженні 5000 Н. На рис. 3.13 видно, яким чином розподіляються осередки накопичення втомних тріщин. Розглянувши осередки накопичення втомних пошкоджень видно, що із середини труби каркасу основи, навпроти кромки площадки пневморесори спостерігається більша концентрація втомних пошкоджень, ніж із зовнішньої сторони. Під час експлуатації автобуса такі накопичення втомних пошкоджень будуть провокувати розвиток структурної корозії. При подальшій експлуатації буде взаємовплив утворення втомних тріщин і корозії. Це пояснює більш інтенсивну корозію поблизу втомної тріщини та те, що корозія у вершині втомної тріщини прискорює процес втомного руйнування.

На рис. 3.14 зображено результати моделювання довговічності каркасу основи у місці з'єднання з правою боковиною. Каркас основи з'єднується зварюванням із каркасом боковини через трубу перерізом $40 \times 40 \times 2$ мм та виготовляється зі Сталі 10. При дослідженнях було задано 1 млн циклів із зусиллям 1000 Н на відстані 500 мм від місця приварювання до труби перерізом $140 \times 60 \times 3,6$ мм.

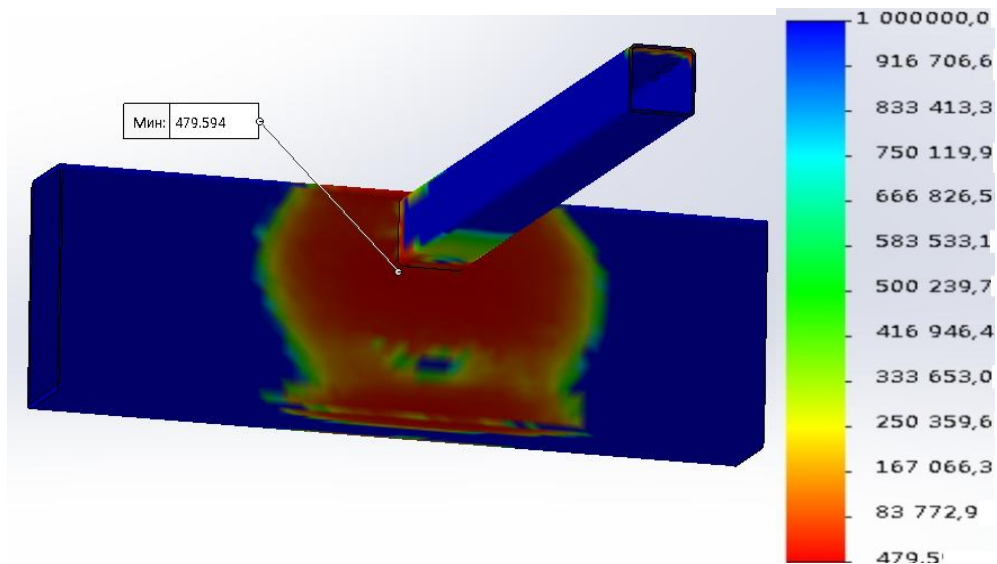


Рисунок 3.14 – Елемент каркасу основи (з'єднання труб перерізом $140 \times 60 \times 3,6$ мм та $40 \times 40 \times 2$ мм), що взятий для моделювання

Результати моделювання (рис. 3.14) підтверджують появу мікротріщин та розвиток магістральних тріщин, які зображені на рис. 3.12. Утворення тріщини починається при 479 циклах симетричних знакозмінних навантажень, що відповідає пробігу 30–40 тис. км реальної експлуатації при середньому навантаженні 1000 Н. Величини циклічних навантажень обрано співрозмірними розрахунковим величинам згідно методології [48] з подвійним коефіцієнтом навантажень та жорстких умовах експлуатації при максимально можливому перевантаженні.

В табл. 3.6 наведено порівняння результатів моделювання з пробігами автобусів на реальних маршрутах до утворення тріщин при жорстких умовах експлуатації.

Таблиця 3.6 – Порівняння результатів моделювання з пробігами автобусів на реальних маршрутах до утворення тріщин при жорстких умовах експлуатації

Місце дослідження процесу пошкоджень каркасу кузова згідно рис. 3.10	Експлуатація автобусів на реальних маршрутах	Моделювання в програмі SolidWorks 2018	
	Середній пробіг до утворення тріщин, км	Навантаження, Н	Кількість циклів до руйнування
Точка 5	30000–40000	1000	479
Точка 1	190000–210000	5000	59

Якщо розглядати експлуатацію автобусів на реальних маршрутах слід відзначити, що жорсткі умови експлуатації фізично не можуть тривати протягом усього робочого часу. Зокрема в години пік це будуть дійсно перевантаження, а у міжпікові періоди автобуси можуть працювати при нормальних умовах, а також не виключені й недовантаження автобусів. Таким чином, загальний пробіг автобуса буде формуватися із окремих конкретних режимів експлуатації згідно залежності [97]

$$S_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{100S_1} + \frac{\alpha_2}{100S_2} + \dots + \frac{\alpha_n}{100S_n}}, \quad (3.64)$$

де S_i – можливий пробіг автобуса до появи тріщини в конкретних умовах експлуатації;

α_i – час роботи автобуса у відповідних умовах експлуатації у %.

Такий метод оцінки довговічності може бути використаний при будь-яких співвідношеннях умов експлуатації. Тому на основі існуючих статистичних даних обстеження пасажиропотоків, чи провівши нові обстеження пасажиропотоків, можна визначити час роботи автобуса при тих чи інших ступенях навантаження. Також одним із методів визначення напружень в

елементах каркасу кузова під дією завантаження автобусів, швидкості руху та якості дорожнього покриття є тензометрування елементів каркасу кузова в проблемних місцях.

На основі прогнозування довговічності лонжеронів каркасу основи з використанням прикладної програми SolidWorks 2018 можна провести аналіз утворення тріщин при реальних умовах експлуатації. Отже, режими роботи автобуса, що відповідають ненормальним умовам експлуатації, спричиняють підсилення корозії під дією накопичення осередків втомного руйнування, що і підтверджують результати досліджень. Причиною розвитку структурної корозії є поєднання та вплив таких чинників: соляних сумішей проти обмерзання доріг, ігнорування миття автобусів після таких поїздок, несвоєчасне виявлення пошкоджень лакофарбового та антикорозійного покриття, відсутність та/або ігнорування обробки закритих порожнин антикорозійними засобами. Тому експлуатуючим організаціям доцільно забезпечити своєчасне періодичне оновлення АЗ внутрішніх порожнин та безвідкладно усувати зовнішні корозійні пошкодження, що дозволить звести до мінімуму вплив корозії на розвиток магістральних втомних тріщин.

Отримані результати, на основі моделювання, дозволяють прогнозувати безаварійну роботу каркасів кузовів автобусів, що порівняні з реальними умовами експлуатації. Максимально дозволений ефективний пробіг до появи тріщини відповідно до реальної експлуатації складає 200 тис. км, що відповідає умовним 59 циклам однієї серії навантажень при середньому навантаженні 5000 Н. Науковцям слід максимально використовувати нові програмні продукти для поглибленого дослідження даної проблеми суміщенням різних факторів руйнування: циклічних знакозмінних навантажень на елементи каркасу кузова при змінних швидкостях руху автобуса та протіканні атмосферної і соляної корозії. Такі дослідження дозволять спрогнозувати ресурс каркасу кузова автобуса при факторах, що будуть максимально наближено відповідати реальним умовам експлуатації.

Прогнозування довговічності лонжеронів каркасу основи автобуса експрес-методом в проблемних місцях дозволяє попередньо визначити навантаження при еквівалентних пробігах, що спричиняють руйнування елементів каркасу кузова. Наступним етапом при прогнозуванні довговічності кузова автобуса в процесі експлуатації буде врахування впливу на кузов стану автомобільних доріг (мікропрофілю доріг), завантаження пасажирями, швидкість руху автобуса у поєднанні з корозією. При чому слід враховувати вплив конструкційних матеріалів і технологій виробництва на експлуатаційну довговічність, що закладається ще на ЕП та виробництва.

3.2.2 Прогнозування довговічності кузова автобуса в процесі експлуатації із урахуванням конструкційних матеріалів і технологій виробництва

3.2.2.1 Оцінка довговічності кузова несівної конструкції

Метою даного дослідження є визначення довговічності елементів каркасу кузова в експлуатаційних умовах із урахуванням конструкційних матеріалів і технологій виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

- провести експерименти на ІМ зі зміною визначених параметрів довговічності автобуса в обраних умовах;
- отримати математичні залежності розрахункового пробігу автобуса до настання граничного стану експлуатації його кузова згідно матриці планування досліджень.

ПРКА несівної конструкції проводиться на основі методології наведеної у підрозділі 3.1.1 із урахуванням передаточної функції від дороги до вертикального переміщення кузова автобуса (підрозділ 3.1.2). При чому було враховано вертикальні переміщення у поєднанні з поздовжньо-кутовими коливаннями автобуса (підрозділ 3.1.2.2).

Спектральні густини та кореляційні функції дії мікропрофілю доріг

використані такі, що описані в підрозділі 3.1.3. Розрахунок довговічності кузова автобуса проводився при випадковому навантаженні (підрозділ 3.1.4.2) у поєднанні із соляно-кліматичною корозією, процес якої математично описаний в підрозділі 3.1.5.

Для дослідження впливу експлуатаційних факторів на довговічність каркасу кузова обрано програмне середовище Matlab 2017 b, що дає можливість проводити ІМ. Додаток Simulink (США) дозволяє розв'язати систему рівнянь, що описують автобус як динамічну систему. В табл. 3.7 наведено параметри автобусів малого класу, що є вихідними даними для розрахунку і моделювання в середовищі Matlab Simulink.

Таблиця 3.7 – Параметри автобусів малого класу (вихідні дані для розрахунку і моделювання)

Параметр	Значення
1	2
База автобуса L , мм	4395
Непідресорена маса передньої осі m_1 , кг	328
Маса передньої підвіски взборі, кг	280
Маса передньої ресори, кг	35
Маса переднього амортизатора, кг	4
Непідресорена маса задньої осі m_2 , кг	554
Маса заднього мосту взборі, кг	410
Маса задньої ресори, кг	35
Маса заднього амортизатора, кг	7
Маса колеса взборі, кг	42
Маса карданного валу, кг	31
Параметри автобуса в спорядженому стані	
Споряджена маса автобуса, кг	5240
Навантаження на передню вісь, кг	2340

Продовження табл. 3.7

1	2
Навантаження на задню вісь, кг	2900
P_1 – навантаження, що тисне на динамометр під переднім лівим колесом, кг	1187
P_2 – навантаження, що тисне на динамометр під переднім правим колесом, кг	1153
P_3 – навантаження, що тисне на динамометр під задніми лівими колесами, кг	1480
P_4 – навантаження, що тисне на динамометр під задніми правими колесами, кг	1420
Відстань по горизонталі від центра ваги до передньої осі l_1 , мм	2432
Відстань по горизонталі від центра ваги до задньої осі l_2 , мм	1963
Підресорена маса, M_p , кг	4358
Параметри автобуса при повній масі	
Повна маса автобуса, кг	8776
Навантаження на передню вісь, кг	3028
Навантаження на задню вісь, кг	5748
Координата центру ваги:	2879
- відстань від вертикальної осі передніх коліс до вертикальної осі центру ваги l_1 , мм	
- відстань від вертикальної осі задніх коліс до вертикальної осі центру ваги l_2 , мм	1516
Підресорена маса M_p , кг	7894
Момент інерції підресореної маси J , кг·м ²	10720
Параметри жорсткості	
Передніх ресор C_1 , Н/м	450000
Задніх ресор C_2 , Н/м	372000

Продовження табл. 3.7

1	2
Пневморесор C_{np} , Н/м	137340–235440
Однієї шини $C_{ш}$, Н/м	235000
Параметри демпфування	
Задніх амортизаторів k_{a2} , Н·с/м	24000
Передніх амортизаторів k_{a1} , Н·с/м	12000
Однієї шини $k_{ш}$, Н·с/м	13500
Зміщення осі переднього амортизатора відносно осі колеса a_1 , мм	110
Зміщення осі заднього амортизатора відносно осі колеса a_2 , мм	420
Зміщення осі пневморесори відносно осі заднього колеса p_2 , мм	260
Маса силового агрегату, кг	480
Маса однієї гайки кріплення колеса, кг	0,188
Маса комплекту випускних труб, кг	20
Маса глушника, кг	20
Максимальна кількість пасажирів	52
Маса одного пасажира, кг	68

3.2.2.1.1 Обґрунтування та розробка матриці проведення імітаційного моделювання

Для побудови емпіричної залежності впливу мікропрофілю дороги (X_1) та завантаження пасажиром (X_2) на довговічність (Y_i) проведено повний факторний експеримент (ПФЕ 2^2) наведений у роботі Адлера Ю. П., Маркова Е. В. та Грановського Ю. В. [90]. В табл. 3.8 надано обрані фактори та їх рівні (верхній: +1; нижній: -1; основний: 0).

Таблиця 3.8 – Значення факторів та відповідно їх рівні

Фактор		Основний рівень (0)	Нижній рівень (-1)	Верхній рівень (+1)
Мікропрофіль дороги, мм	X_1	Мікропрофіль рівнозамощеної бруківки	Мікропрофіль асфальтобетонного покриття	Мікропрофіль бруківки низької якості
		30	10	50
Завантаження пасажирями, чол	X_2	52	21	83

Кількість дослідів визначається за формулою: $N = 2^2 = 4$. Матриця планування експерименту зведена в табл. 3. 9.

Таблиця 3.9 – Матриця планування експерименту

Номер дослідів	X_1	X_2	Y_i
1	-1	-1	Y_1
2	+1	-1	Y_2
3	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4
1_0	0	0	Y_{01}
2_0	0	0	Y_{02}
3_0	0	0	Y_{03}

Y_i – довговічність каркасу кузова – це пробіг L (визначається за формулою (3.57) під час моделювання у км) до руйнування елемента каркасу кузова, що відповідає граничному терміну експлуатації.

Рівняння математичної моделі у натуральному масштабі буде мати наступний вигляд

$$Y = b_0 + b_1\tilde{X}_1 + b_2\tilde{X}_2 + b_{12}\tilde{X}_1\tilde{X}_2. \quad (3.65)$$

Для переходу від натурального до нормованого масштабу виконаємо кодування значень X_1, X_2 за наступними формулами

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i0}}{\Delta \tilde{X}_i}, \quad (3.66)$$

де X_i – кодоване значення фактору (у нормованому масштабі);

i -й номер фактору;

\tilde{X}_i – поточне значення фактору (у натуральному масштабі);

\tilde{X}_{i0} – значення фактору на основному рівні (у натуральному масштабі);

$\Delta \tilde{X}_i$ – інтервал варіювання фактору (у натуральному масштабі), що обчислюється за формулою

$$\Delta \tilde{X}_i = \frac{\tilde{X}_{i\max} - \tilde{X}_{i\min}}{2} \quad (3.67)$$

де $\tilde{X}_{i\max}$ – значення верхнього рівня фактору;

$\tilde{X}_{i\min}$ – значення нижнього рівня фактору.

Рівняння математичної моделі у нормованому масштабі буде мати наступний вигляд

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2. \quad (3.68)$$

При цьому фактори мають безрозмірний вигляд, а їх значення прийняті (+1) – верхній рівень, (-1) – нижній рівень і (0) – середній (основний) рівень.

Для розрахунку коефіцієнтів регресії був використаний метод найменших квадратів (МНК). Умова МНК записується наступним чином

$$U = \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \min \quad (3.69)$$

Формули для розрахунку коефіцієнтів регресії можна записати в такому вигляді

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; \quad b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i X_{ji}; \quad b_{uj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i X_{ui} X_{ji}, \quad (3.70)$$

де N – загальне число дослідів;

y_i – параметр відгуку в i -тій точці;

X – кодоване значення фактору;

i – номер дослідів (рядка у матриці планування);

$j=u=0, 1, 2, \dots, k$ – номери факторів.

Дисперсію повторюваності дослідів визначимо за формулою

$$S_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2, \quad (3.71)$$

де n – кількість повторюваних дослідів;

y_q – параметр відгуку;

\bar{y} – середнє арифметичне відхилення параметру відгуку

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_q, \quad (3.72)$$

де $q = 1, 2, \dots, n$ – номер паралельного дослідів.

Перевірку значимості коефіцієнтів регресії виконано, попередньо визначивши довірчий інтервал коефіцієнтів. Для всіх коефіцієнтів регресії довірчі інтервали рівні між собою і визначені за формулою

$$\Delta b_j = \pm t \sqrt{\frac{S_0^2}{N}}, \quad (3.73)$$

де t – табличне значення критерію Стюдента при заданому рівні значимості α та відповідному числі ступенів вільності. Рівень значимості приймався $\alpha = 5\%$ [90].

Число ступенів вільності для дисперсії повторюваності визначено за формулою

$$f_1 = n - 1, \quad (3.74)$$

де n – число повторних дослідів;

1 – число ступенів вільності, використаних при розрахунку середнього арифметичного для параметру відгуку.

Коефіцієнт регресії значимий, якщо його абсолютна величина більша, ніж довірчий інтервал.

Перевірка адекватності моделі проводилася за F - критерієм Фішера

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}, \quad (3.75)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{f_2}, \quad (3.76)$$

де f_2 – число ступенів вільності для дисперсії адекватності, рівне числу різних дослідів, результати яких використовуються при розрахунку коефіцієнтів регресії, мінус число коефіцієнтів, що визначаються;

$$f_2 = N - (k + 1), \quad (3.77)$$

де N – загальне число дослідів;

k – число факторів експерименту.

Рівень значимості, як і в попередньому випадку, приймаємо $\alpha=5\%$. Модель можна вважати адекватною, якщо розрахункове значення F -критерію Фішера не перевищує табличного значення.

3.2.2.1.2 Результати моделювання параметрів довговічності автобуса в обраних умовах

Згідно розробленого плану експерименту було проведено моделювання довговічності кузова автобуса та отримані такі значення довговічності, які представлені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати моделювання довговічності згідно матриці планування експерименту

Номер дослідів	X_1	X_2	Y_i
1	2	3	4
1	Мікропрофіль асфальтобетонного покриття	21 пасажир	1289315 км
2	Мікропрофіль бруківки низької якості	21 пасажир	457232 км

Продовження таблиці 3.10

3	Мікропрофіль асфальтобетонного покриття	83 пасажери	756321 км
4	Мікропрофіль бруківки низької якості	83 пасажери	57523 км
5	Мікропрофіль рівнозамощеної бруківки	52 пасажери	640635 км
6	Мікропрофіль рівнозамощеної бруківки	52 пасажери	670738 км
7	Мікропрофіль рівнозамощеної бруківки	52 пасажери	680737 км

За отриманими даними (табл. 3.10) проведено розрахунок математичних залежностей довговічності автобуса.

На основі наведеного алгоритму було розроблено програму для розрахунку коефіцієнтів регресії для розроблених математичних моделей у нормованому і натуральному масштабах, а також виконання перевірки на адекватність отриманих математичних моделей. Загальний вигляд інтерфейсу програми представлений на рис. 3.15. Програма розроблена з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel.

В результаті розрахунків був отриманий апроксимуючий поліном

$$\hat{Y} = 640097,8 - 382720,25X_1 - 233175,75X_2 + 33321,25 X_1X_2 . \quad (3.78)$$

Значимість коефіцієнтів регресії визначено із врахуванням величини довірчого інтервалу Δb_j . За результатами розрахунків можна зробити висновок, що при $\Delta b_j=40165,8$ значимими є всі розраховані коефіцієнти регресії, крім b_{12} .

J6		f							
A	B	C	D	E	F	G	H		
1	Рівень фактора	X1 (Мікропрофіль дороги, мм)	X2 (Завантаження пасажирами, чол)	LnRa	LnP	Розрахунок математичної моделі довговічності автобуса A092H6			
2	1	50	83	1,698970004	1,919078092				
3	-1	10	21	1	1,322219295				
4	0	30	52	1,477121255	1,716003344				
5									
6									
7	№	X0	Мікропрофіль дороги	Завантаження пасажирами	X12	L, км	ln(L)	LN(L)	
8	1	1	1	1	1	57523	4,759841528	24201,75	
9	2	1	1	-1	-1	457232	5,660136617	490553,25	
10	3	1	-1	1	-1	756321	5,878706159	789642,25	
11	4	1	-1	-1	1	1289315	6,110359035	1255993,75	
12	5	0	0	0		640635	5,806610662		
13	6	0	0	0		670738	5,826552912		
14	7	0	0	0		680737	5,832979356		
15									
16									
17	b0	b1	b2	b12					
18	640097,8	-382720,25	-233175,75	33321,25					
19	Оцінка значимості коефіцієнтів								
20	1	1	1	0	Лінійність моделі:	Лінійна			
21	Коефіцієнти для р-ня з дійсними змінними								
22	5467371	-1913601,25	-1165878,75	0					
23									
24	Дисперсія відтворюваності експерименту:				435723502,3				
25	Число степенів вільності 1:				2				
26	Дисперсія коефіцієнтів регресії:				87144700,47				
27	Табличний критерій Стюдента при $p=0,95$:				4,30265273				
28	Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії:				40165,83372				
29									
30	Число степенів вільності 2:				2				
31	Дисперсія адекватності:				2220611403				
32	Розрахунковий критерій Фішера при $p=0,95$:				5,096377384				
33	Табличний критерій Фішера при $p=0,95$:				19				
34	Адекватність моделі:				Адекватна				

Рисунок 3.15 – Загальний вигляд інтерфейсу програми розрахунку коефіцієнтів регресії та перевірки на адекватність отриманої математичної моделі

Отримані математичні моделі є адекватними, оскільки за результатами розрахунку значення F -критерію Фішера становлять $F_p = 5,096$, що значно менше табличного значення $F_T = 19$ [90].

В результаті проведення експериментів за допомогою імітаційної моделі отримано граничні пробіги кузова автобуса, що обмежуються руйнуванням елементів каркасу кузова та визначають його довговічність. Як показують результати моделювання (табл. 3.10), мінімальне значення довговічності буде при півторакратному перевантаженні (83 пасажирів) та при русі по дорозі низької якості (мікропрофіль бруківки низької якості) і складає всього 57523 км пробігу. Такий малий ресурс автобуса (довговічність) пояснюється надмірними навантаженнями на елементи каркасу кузова від дороги низької якості з одного боку та від перевантаження пасажирами – з іншого. Такі результати

співрозмірні з експлуатацією автобусів на реальних маршрутах по дорогах низької якості. Максимальне наближення результатів до реалій експлуатації можна пояснити врахуванням у математичній моделі руху автобуса з пробоями підвісок. З табл. 3.10 також видно, що при півторакратному завантаженні автобуса (83 пасажери) та русі по дорозі високої якості РКА складає 756321 км. А такий показник довговічності практично відповідає довговічності силового агрегату (завод-виробник агрегатної бази заявляє ресурс близько 1 млн км). Таке значення довговічності (756321 км) при півторакратному перевантаженні пояснюється конструктивно закладеним коефіцієнтом запасу міцності кузова, який складає 1,75.

Результати моделювання дозволяють максимально наближено оцінити РКА. На відміну від [16], де розглядається оцінка довговічності залізничних вагонів, не враховано знакозмінні навантаження від мікропрофілю дороги. Оскільки колеса вагонів котяться по сталевих коліях, де врахування мікропрофілю дороги є недоцільним. У роботах [17–21], в яких проводилось моделювання довговічності автобусів, де не враховувалась корозія кузова, результати дещо ідеалізовані. Тому, на відміну від [17–21], наближення результатів моделювання стало можливим із урахуванням корозійних процесів у поєднанні з рухом по дорогах різної якості та різним завантаженням пасажирями. На відміну від натурних випробувань [23–25] на довговічність, запропонована та реалізована методологія дозволяє з мінімальними витратами у найкоротший термін визначити РКА.

Таким чином, отримані рішення дозволяють визначати довговічність каркасу кузова із урахуванням мікропрофілю дороги різної якості (також враховуючи пробої підвісок), урахуванням різного завантаження пасажирями у поєднанні із корозією кузова автобуса, а також із властивостями застосованих матеріалів, що раніше не використовувались для визначення довговічності автобусів.

Обмеження цього дослідження полягають у наступному. Дана математична модель без змін може використовуватись для дослідження

довговічності автобусів А092Н6 «Атаман» у різних умовах експлуатації. Методологія дозволяє застосувати дану модель і на інші автобуси громадського транспорту тільки при внесенні параметрів автобусів, що підлягають дослідженню із послідуною перевіркою адекватності моделі. На автобусах не громадського транспорту дана модель застосовуватись без суттєвих змін не може.

Недоліком даного дослідження є те, що моделювання проводилось при сталій середній швидкості 40 км/год та конкретних фіксованих мікропрофілях дорожнього покриття. В реальній практиці експлуатації автобус на одному маршруті може рухатись по дорогах із ділянками різного типу мікропрофілів: асфальтобетонне покриття, бруківка задовільної якості, бруківка із впадинами і горбами, а у роботі досліджувався рух тільки по дорозі з однотипним покриттям. У такому випадку доцільним буде, при подальших дослідженнях, враховувати відсоток руху автобуса по дорогах різної якості. Моделювання буде більш наближене у тому випадку, коли виникне питання у експлуатуючих організацій у визначенні довговічності за результатами вимірювання характеристик мікропрофілю дороги із отриманням масиву даних. Внесення масиву вже передбачено в розробленій моделі.

При подальших дослідженнях можливе також проведення тензометрування найбільш навантажених елементів каркасу кузова та визначення їх деформацій на реальних маршрутах. Це дозволить отримати масив даних, що можна внести до моделі на етапі розрахунку напружень в елементах каркасу кузова та врахувати реальний мікропрофіль дороги, завантаження пасажирями та зміну швидкості руху.

Для можливості впливу на РКА на рамному шасі ще на стадії проектування, вносячи зміни до конструкції кузова та співставлення довговічності автобусів несівної конструкції із автобусами на рамному шасі, доцільним є визначення довговічності кузова автобуса і на рамному шасі.

3.2.2.2 Оцінка довговічності кузова автобуса на рамному шасі

Метою дослідження є оцінка довговічності кузова автобуса на рамному шасі. Це дасть можливість впливати на РКА на рамному шасі ще на стадії проектування, вносячи зміни до конструкції кузова.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

– вдосконалити методику [90] по визначено довговічності кузова автобуса несівної конструкції для можливості проведення досліджень автобусів на рамному шасі;

– провести оцінку довговічності кузова автобуса на рамному шасі використанням імітаційного комп'ютерного моделювання.

Вдосконалена методика для проведення оцінки довговічності кузова автобуса на рамному шасі наведена в підрозділі 3.1.1.

Згідно вдосконаленої методики за результатами ІМ отримано результати, які наведено в табл. 3.11

Таблиця 3.11 – Результати оцінки довговічності кузова автобуса на рамному шасі

Мікропрофіль дороги	Довговічність каркасу кузова, км	Довговічність рами, км
Асфальтобетонне покриття	1376970	2478532
Рівнозамощена бруківка	907653	1452406
Бруківка низької якості	493452	838870

В табл. 3.11 наведено результати при середній швидкості 40 км/год та максимально допустимому завантаженні пасажирями (40 пасажирів).

Концептуальні рішення по вдосконаленню методики для визначення довговічності кузовів автобусів на рамному шасі дозволяють проводити дослідження автобусів не тільки несівної конструкції, а і на рамному шасі.

В результаті проведеного дослідження визначено РКА на рамному шасі

при різних типах дорожнього покриття. З табл. 3.11 видно, що максимальні значення довговічності будуть у рами автобуса та перевищують довговічність кузова у 1,5–1,8 разів. У цьому отримані результати підтверджують досвід реальної експлуатації автобусів. Такі результати підтверджують припущення, що рама із легованої сталі та відкритої конструкції із кращою вентиляцією матиме більшу довговічність. І навпаки, КК, що виготовлений із сталевих труб закритої конструкції буде інтенсивніше кородувати по причині конденсації вологи в закритих порожнинах. Також мають логічні підтвердження показники довговічності каркасу кузова і рами при поліпшенні якості дорожнього покриття. Чим вища якість дорожнього покриття, тим менші відхилення будуть від його мікропрофілю та менші поштовхи передаватимуться через підресорені маси m_1 та m_2 до рами та каркасу кузова.

На відміну від [90], де проводиться розрахунок довговічності тільки автобусів несівної конструкції, вдосконалена методика дозволяє проводити розрахунок довговічності кузова автобуса рамної конструкції. Це стає можливим завдяки врахуванню особливості конструкції автобусів на рамному шасі. При такому дослідженні враховано геометричні розміри перерізів рами, її фізико-механічні властивості та особливості протікання корозії в процесі експлуатації. Підтверджено, що при корозійному та втомному руйнуванні каркасу кузова інтенсивність втомних руйнувань рами зростає.

Вдосконалена методика та отримані дослідження дозволяють визначати довговічність автобуса на рамному шасі, що імітує реальні умови експлуатації. Це дозволяє оцінити довговічність автобуса для експлуатуючих організацій та проводити планові ВР. Також на ЕП можна розробляти нові технічні рішення по поліпшенню корозійної стійкості каркасу кузова, довговічність якого в 1,5–1,8 поки що менша за довговічність рами. Раціональним варіантом була б така конструкція каркасу кузова, довговічність якої була б рівною довговічності кузова. Таким чином, поліпшення методів АЗ каркасу кузова на ЕП та проведення періодичного додаткового захисту його закритих порожнин дозволить довговічність каркасу кузова довести до довговічності рами.

Обмеження даного дослідження полягає в тому, що можуть бути відсутні характеристики по інтенсивності корозії каркасу труб кузова з інших матеріалів та при інших методах АЗ.

До недоліків даних досліджень може бути віднесена відсутність інформації по фізико-механічних властивостях рам, що можуть поставлятися з новими машинокомплектами іноземного виробництва. Також можлива відсутність статистичних залежностей по корозійних руйнуваннях каркасу кузова при застосуванні нових прогресивних засобів захисту від корозії.

Розвиток даного дослідження може полягати у проведенні лабораторних випробувань нових матеріалів із метою визначення їх фізико-механічних та ресурсних характеристик зразків. Також потрібно накопичувати статистичні дані щодо корозійної стійкості кузовів автобусів при тих чи інших вдосконаленнях АЗ. Доцільним також буде проведення прискорених випробувань зразків з метою визначення інтенсивності корозії та отримання математичних залежностей для внесення до імітаційної моделі. Можливий варіант дослідження, при якому отримується масив даних відносних деформацій досліджуваного перерізу на конкретному маршруті за допомогою портативних тензометричних станцій.

3.3 Визначення граничних термінів експлуатації з умов пасивної безпеки

Метою дослідження є визначення граничних термінів експлуатації з умов ПБ. Це дасть можливість забезпечити відповідність кузова вимогам ПБ перевезення пасажирів протягом всього терміну експлуатації автобуса.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- розробити метод контролю відповідності кузова автобуса методами ІМ в основі якого є неруйнівний контроль;
- провести ІМ відповідності кузова умовам ПБ у процесі експлуатації.

3.3.1 Матеріали та методи досліджень

Визначення граничних термінів експлуатації з умов ПБ проводиться за допомогою ІМ із використанням розрахункового комплексу ANSYS R 19.0 (США) методом скінченних елементів згідно Правил ЄЕК ООН № 66 [3]. Методика проведення ІМ з використанням розрахункового комплексу ANSYS R 19.0 (США) методом скінченних елементів детально описана в роботах [36, 48, 98]. На відміну від робіт [36, 48, 98], де проводились дослідження нового кузова автобуса, для систематизації проведення розрахунків міцності кузова автобуса під час експлуатації згідно Правил ЄЕК ООН № 66 з урахуванням деградації металу складено блок-схему (рис. 3.16).

Аналогічно із методологією [36, 48, 98] КК автобуса подано тривимірною стрижневою моделлю, яка містить такі типи елементів: стрижень, балка (розтягування/стиснення, згин, кручення), ферма (розтягування/стиснення), 4-кутова пластина, 3-кутова пластина, 8-вузловий октаедр, 6-вузлова трикутна призма, 4-вузловий тетраедр [99]. Кожен елемент конструкції має власну локальну систему координат. Для зручності всі системи координат правосторонні. У локальній системі координат задаються такі атрибути вузла: закріплення ступенів свободи, пружні закріплення, шарніри, переміщення у напрямку фіксованих ступенів свободи. Система координат стрижня орієнтована завжди таким чином, що вісь X направлена вздовж його осі. Орієнтація перетину стрижня жорстко прив'язана до його системи координат. Окрім цього, навантаження на стрижень також задаються в локальній системі координат стрижня. Система координат пластини орієнтована так, що вісь Z спрямована за нормаллю до площини пластини, вісь X паралельна одній із сторін пластини, а вісь Y доповнює систему векторів до правосторонньої.

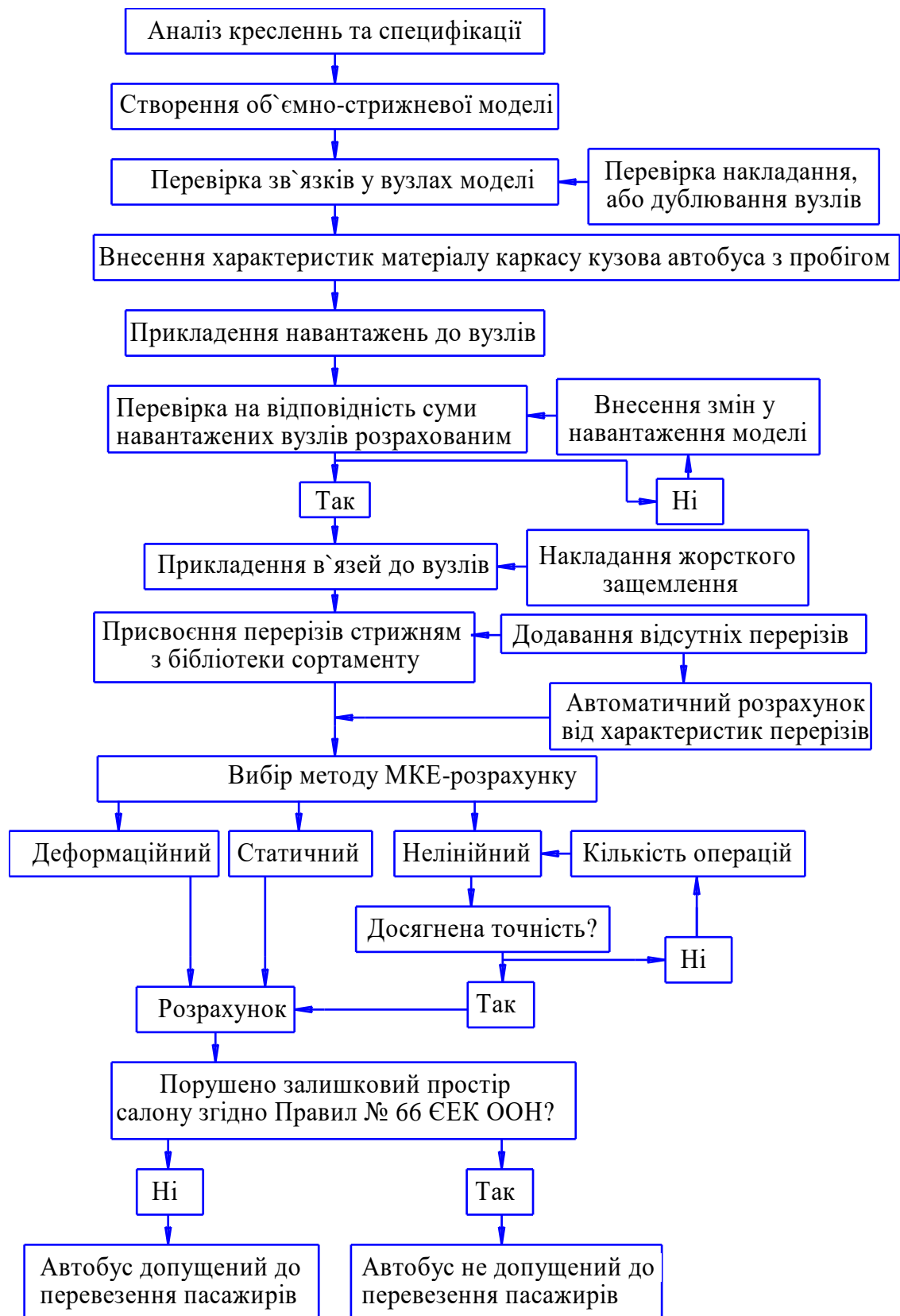


Рисунок 3.16 – Блок-схема алгоритму проведення розрахунків міцності кузова автобуса під час експлуатації на відповідність вимогам Правил СЕК ООН № 66 [99]

У локальній системі також задається нормальне розподілене навантаження на пластину.

Система координат об'ємного елемента збігається з глобальною системою координат. Ступені свободи: вузол має шість ступенів свободи, стрижень – 12, пластина – 18 або 24. Об'ємні елементи мають 12, 18 або 24 ступенів свободи, по три (лінійні переміщення) у кожному вузлі. Згідно конструкторської документації на автобус у розрахунку прийняті такі профілі стрижнів: $63 \times 32 \times 2.5$, $63 \times 45 \times 3$, $80 \times 40 \times 3$, $100 \times 54 \times 4$.

На відміну від робіт [35, 36, 48, 98], до моделі вносяться характеристики матеріалу каркасу кузова автобуса, що вже був у експлуатації: межа текучості $\sigma_T=37$ МПа, напруження витривалості $\sigma_B=299$ МПа, відносне видовження $\delta=16\%$, які отримані під час лабораторних випробувань [100]. Характеристики елементів каркасу кузова з пробігом можна визначати при ВР кузова в конкретизованих умовах експлуатації та при заданих термінах експлуатації. Проведення розрахунків міцності кузова автобуса під час експлуатації на відповідність вимогам Правил ЄЕК ООН № 66 повинно задовольняти певним умовам. Перша умова: кожна секція кузова, що випробовується, міцно і надійно закріплюється на випробувальному стенді за допомогою жорсткої конструкції. Навколо точок кріплення не повинно виникати місцевої пластичної деформації. Друга умова: місце і метод кріплення не повинен перешкоджати формуванню прогнозованих зон пластичної деформації та роботі пластичних шарнірів.

Для прикладення навантаження до секції кузова, у відповідності до Правил № 66 ЄЕК ООН, були забезпечені дві вимоги. Перша вимога – навантаження рівномірно розподіляється по верхній обв'язці через жорсткий брус. Довжина бруса більше, ніж у верхній обв'язці для імітації поверхні землі у випробуванні на перекидання. Друга вимога – навантаження прикладається до бруса в центрі ваги секції кузова. Центр ваги визначається по масах, що входять до секцій силової структури і з'єднують їх конструктивні елементи.

Розрахунок складається з кількох етапів визначення крайових умов.

1. Згідно технічного завдання на автобус, що досліджується складено розрахункову схему (рис. 3.17) навантажень з визначення координат зведеного центра ваги O на основі положення зосередженої маси та її значення для таких складових: водій, двигун із навісним обладнанням, трансмісія, додаткове оснащення (система керування та гальм, паливний бак, запасне колесо, акумуляторні батареї, решта відповідних вузлів та агрегатів), КК з урахуванням зовнішнього облицювання, внутрішньої обшивки та шасі з навісними агрегатами.

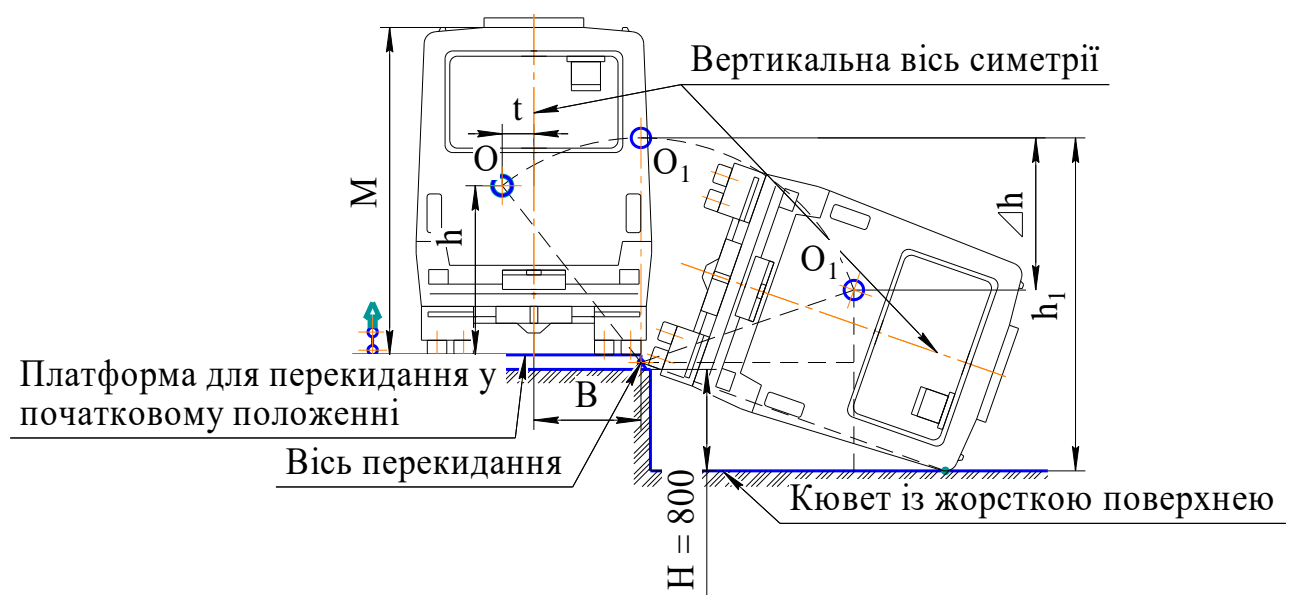


Рисунок 3.17 – Розрахункова схема траєкторії падіння автобуса до моменту удару відповідно до Правил № 66 Європейської економічної комісії Організації Об'єднаних Націй

Отримано координати центра ваги автобуса: висота положення $l_k=0,77$ м; зміщення стосовно поздовжньої осі симетрії шасі відсутнє; відстань від передньої осі коліс до теоретичного центра ваги у горизонтальному напрямку коротша на 3% від справжнього положення, обчисленого за реакціями коліс на основі реального зважування (2349 мм).

2. Згідно з законом збереження енергії для рівнозмінного обертального руху під дією сили тяжіння обчислюється кінцева кутова швидкість обертання на

момент удару каркаса кузова з ударною поверхнею: $\omega = 2,59$ рад/с. Оскільки Правила ЄЕК ООН № 66 вимагають відсутності додаткового зовнішнього впливу на процес перекидання, окрім дії сили ваги, то значення початкової кутової швидкості у розрахунках було прийняте за нуль.

3. За допомогою інженерного програмного забезпечення та робочих креслень автобуса моделі БАЗ – А079.23 заміряно реальну величину радіуса обертання центра ваги та відповідний їй кут обертання: $r = 1,22$ м; $\varphi = 0,28\pi$. Виразивши кутове прискорення ε через кутову швидкість ω , визначено час, затрачений на перекидання автобуса: $t = 0,68$ с.

4. На основі отриманих розрахункових параметрів обертове та доцентрове прискорення становить: $a_{об} = 4,65$ м/с², $a_{доц} = 8,18$ м/с². Імітація Правил ЄЕК ООН № 66 розрахунковим методом передбачає врахування результуючого прискорення $a_{рез}$ під час визначення величини енергії поглинання удару E . Отримані значення прискорень та енергії абсорбції удару стосуються матеріальної точки.

Для максимальної точності імітації проведення випробувань на відповідність Правилам ЄЕК ООН № 66 прикладення в'язей обмеження руху виконано у вузлах просторової структури каркасу кузова, найменш піддатливих деформаціям удару: потужна ферма шасі автобуса та нижні пороги лівої боковини.

На рис. 3.18 наведено принципову схему установки відповідно до Правил № 66 ЄЕК ООН при імітації перекидання автобуса.

Після перекидання автобуса набік згідно Правил ЄЕК ООН № 66 деформації стійок повинні бути такими, щоб не перекривали безпечний залишковий простір у вигляді заштрихованої трапеції, зображеною на рис. 3.18.

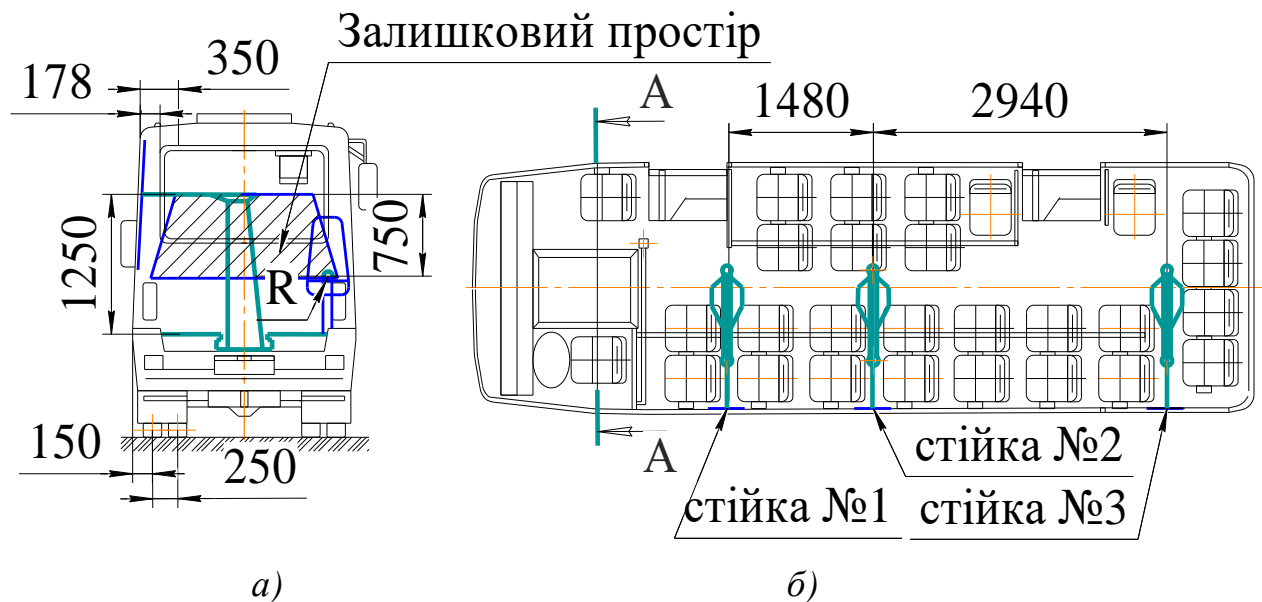


Рисунок 3.18 – Принципова схема установки для проведення випробування згідно Правил № 66 Європейської економічної комісії Організації Об'єднаних Націй: а) – вид ззаду; б) – вид зверху

У випадку виходу за межі допуску такий кузов вибраковується та не підлягає відновленню [101].

3.3.2 Результати імітаційного моделювання відповідності кузова автобуса умовам пасивної безпеки

ІМ відповідності кузова автобуса умовам ПБ реалізується за результатами випробувань матеріалів каркасу кузова автобуса, що був у експлуатації. Для проведення ІМ обрано властивості матеріалу, що мають найбільше значення межі витривалості (зразок № 5): $\sigma_T=37$ МПа, $\sigma_B=299$ МПа, $\delta=16\%$. На рис. 3.19 показано автобус під час ІМ згідно Правил ЄЕК ООН № 66.

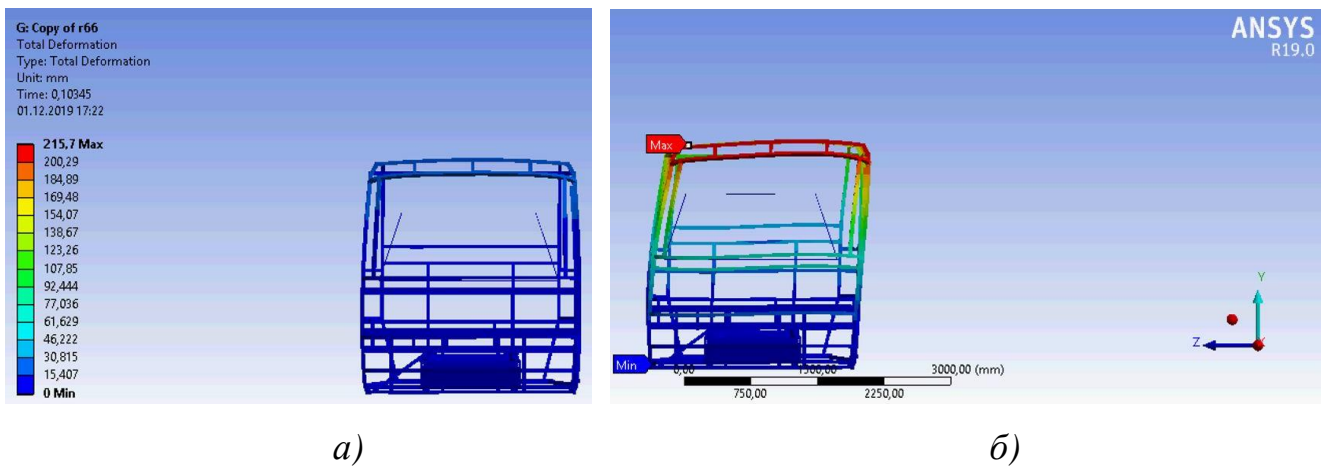


Рисунок 3.19 – Автобус під час ІМ згідно Правил Європейської економічної комісії Організації Об’єднаних Націй № 66: а) – до перекидання; б) – після перекидання

В табл. 3.12 наведено порівняльні результати випробувань нового автобуса [36, 48] та автобуса із терміном експлуатації вісім років.

Таблиця 3.12 – Порівняння деформації стійок нового та восьмирічного автобуса

Деформація стійок автобуса Δe , мм	Номер стійки		
	1	2	3
Новий [36, 48]	178	135	74
Восьмирічний	393	344	282

Результати ІМ показують, що автобус після восьми років експлуатації вже не буде відповідати вимогам Правил ЄЕК ООН № 66.

За результатами проведення ІМ згідно Правил Європейської економічної комісії Організації Об’єднаних Націй № 66 (табл. 3.12) видно, що при погіршенні межі витривалості в 1,14 разів та межі текучості в 6,35 рази, деформація стійок восьмирічного автобуса збільшується в 2,21–3,81 рази. Тому такий автобус вже не відповідає Правилам ЄЕК ООН № 66. При спірних ситуаціях для перевірки відповідності автобуса до Правил ЄЕК ООН № 66

виникне потреба у додатковому вирізанні зразка із однієї з стійок автобуса. Таке рішення можна прийняти тільки у крайньому випадку. Таким чином повноцінний технічний контроль автобусних кузовів під час експлуатації з умов ПБ можливий при врахуванні всіх трьох запропонованих варіантів.

Проведені дослідження на відміну від [26] враховують ПБ перевезення пасажирів, що з тривалими термінами експлуатації вплине і на комфорт їх перевезення. Оскільки послаблення структури елементів каркасу кузова призведе до зростання поштовхів від дорожнього полотна до пасажирських сидінь.

Інтелектуальні транспортні системи [27] можна було б у подальших дослідженнях доповнити тензометруванням кузовів автобусів. Це дозволило б також контролювати деформації елементів каркасу кузова, збільшення яких може свідчити про погіршення механічних властивостей матеріалу.

Визначення динамічного навантаження при генеруванні вібрації від мікропрофілю дорожнього покриття на кузов автомобіля, який застосовується на ЕП [8], доцільно застосовувати і під час експлуатації. Це в подальших дослідженнях у поєднанні із методами [32] дозволило б спрогнозувати погіршення механічних властивостей матеріалу та настання моменту невідповідності вимогам Правил [3].

Планування закупівель автобусів [30] стане більш коректним, коли основним чинником заміни автобуса буде його невідповідність вимогам Правил ЄЕК ООН № 66 під час експлуатації та недоцільність проведення ВР.

На відміну від [35, 36, 48], де проводиться ІМ перекидання тільки нового автобуса згідно Правил ЄЕК ООН № 66, розроблені технологічні засади дозволяють проводити такі випробування, враховуючи деградацію металу в процесі експлуатації. Це стає можливим завдяки проведенні досліджень на розривній машині зразків, які вирізаються з каркасу кузова під час ВР [102]. Отримані значення фізико-механічних властивостей деградованого металу каркасу кузова вносяться в імітаційну модель, що і дає можливість контролювати відповідність автобуса умовам ПБ під час його експлуатації.

При впровадженні у реальну практику експлуатації автобусів слід враховувати також обмеження. Контроль відповідності кузова стосується тільки автобусів, які призначені для перевезення пасажирів, ПБ яких регламентується згідно Правил ЄЕК ООН № 66. При відсутності інформації по деградації елементів каркасу кузова контроль обмежується візуальним контролем та ультразвуковими засобами вимірювання товщини металу.

До недоліків дослідження слід віднести збільшення норм часу на проведення технічного контролю у порівнянні з класичним візуальним контролем. Як результат це спричиняє додаткові витрати на придбання засобів вимірювання та на проведення лабораторних випробувань дослідних зразків.

Розвиток даного дослідження може полягати в подальшому проведенні експериментальних досліджень по визначенні фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова при різних термінах та умовах експлуатації автобусів. Накопичені статистичні дані дозволять підвищити ефективність ІМ при перевірці ПБ автобуса згідно Правил ЄЕК ООН № 66, враховуючи різні умови експлуатації.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Розроблено програмний комплекс для імітаційного моделювання-розрахунку зміни міцності каркасу кузова автобуса залежно від пробігу і часу експлуатації під різні типові умови – сфери використання автобусів.

2. Розроблено програмний комплекс для прогностичної оцінки впливу використання тих чи інших сортamentів прокату і марок сталі на зміну допустимого ресурсу кузова з умов дотримання відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки.

3. Проведено моделювання параметрів довговічності автобуса в обраних умовах і встановлено, що на ресурс кузова автобуса суттєво впливають пробої підвісок автобуса, при справній підвісці та при русі по дорогах низької якості та постійних перевантаженнях. Причому врахування пробоїв підвісок автобуса максимально наблизило результати моделювання до реалій експлуатації.

Мінімальний пробіг до руйнування лонжеронів каркасу основи кузова автобуса склав 57523 км, при півторакратному перевантаженні пасажирами та русі автобуса по бруківці низької якості. Максимальний пробіг до руйнування лонжеронів каркасу основи кузова автобуса склав 1289315 км, при перевантаженні тільки пасажирів, що сидять, та русі автобуса по дорозі високої якості з асфальтобетонним покриттям. Тому ресурс кузова автобуса громадського транспорту, при такій конструкції, лежить у межах 57523–1289315 км залежно від умов експлуатації. Таким чином, змінюючи конструкцію кузова, можна вплинути на довговічність ще на етапі проектування, отримуючи конкретні значення довговічності кузова автобуса.

4. Отримано рівняння математичної моделі у нормованому масштабі, що дозволяє прогнозувати безаварійну роботу каркасів кузовів автобусів, що порівняні з реальними умовами експлуатації. Отримані результати дозволять науковцям та інженерам-конструкторам виконувати поглиблене дослідження даної проблеми суміщенням різних факторів руйнування: циклічних знакозмінних навантажень на елементи каркасу кузова при змінних швидкостях руху автобуса та протіканням атмосферної і соляної корозії. Адекватність підтверджено за критерієм Фішера ($F_P < F_T$). Абсолютне максимальне значення має коефіцієнт b_1 , тому фактор X_1 (мікропрофіль дороги) має більший вплив на ресурс кузова автобуса, що підтверджується підвищеною довговічністю кузова в досліді з асфальтобетонним покриттям при завантаженні 83 пасажирами (довговічність 756321 км), у порівнянні з дослідом з рівнозамощеною бруківкою при завантаженні 52 пасажирами (довговічність 640635 км).

5. Проведено оцінку довговічності кузова автобуса на рамному шасі використанням імітаційного комп'ютерного моделювання, яка лежить у межах від 5 до 11 років залежно від умов експлуатації. При дослідженні враховано такі фактори: завантаження пасажирами, мікропрофіль дороги, швидкість руху автобуса, корозія. Довговічність автобуса залежить, в першу чергу, від довговічності рами та каркасу кузова. Оскільки рама виготовляється із легованих сталей та термооброблена, при утвореннях тріщин рами вона не

ремонтуються, а замінюється на нову. Встановлено, що рама має в 1,5–1,8 рази більшу довговічність, ніж сам каркас кузова. Це пояснюється тим, що рама виготовлена із легованих матеріалів та має відкриту конструкцію, що забезпечує кращу її вентиляцію. Проведені результати дослідження вказують на першочергове поліпшення антикорозійного захисту каркасу кузова, щоб наблизити його ресурс до ресурсу рами.

6. Розроблено метод контролю відповідності кузова автобуса методами імітаційного моделювання під час експлуатації з умов пасивної безпеки згідно до вимог Правил ЄЕК ООН № 66, що дозволило відмовитись від руйнівних методів контролю. Неруйнівний метод контролю дозволяє здійснювати перевірку кузова автобуса з умов пасивної безпеки згідно до вимог Правил ЄЕК ООН № 66 в експлуатаційних умовах, що раніше не було можливим. На основі розробленої методології проведено перевірку кузова автобуса на відповідність умовам пасивної безпеки згідно до вимог Правил ЄЕК ООН № 66 методами імітаційного моделювання. В результаті експерименту встановлено, що деформація стійок восьмирічного автобуса збільшується в 2,21–3,81 рази. Це вказує на неприпустимість експлуатації автобуса.

РОЗДІЛ 4

НАТУРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ АВТОБУСІВ У РЕАЛЬНІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

4.1 Визначення зміни характеристик міцності труб каркасу у процесі експлуатації

4.1.1 Матеріали та методи досліджень

Метою експериментальних досліджень є визначення фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса з пробігом.

Для проведення експерименту були вирізані елементи кузова [54], які, у першу чергу, послаблюють каркас та підлягають заміні.

Форма і розміри зразків згідно методики [103], що використовувались під час досліджень, зображено на рис. 4.1.

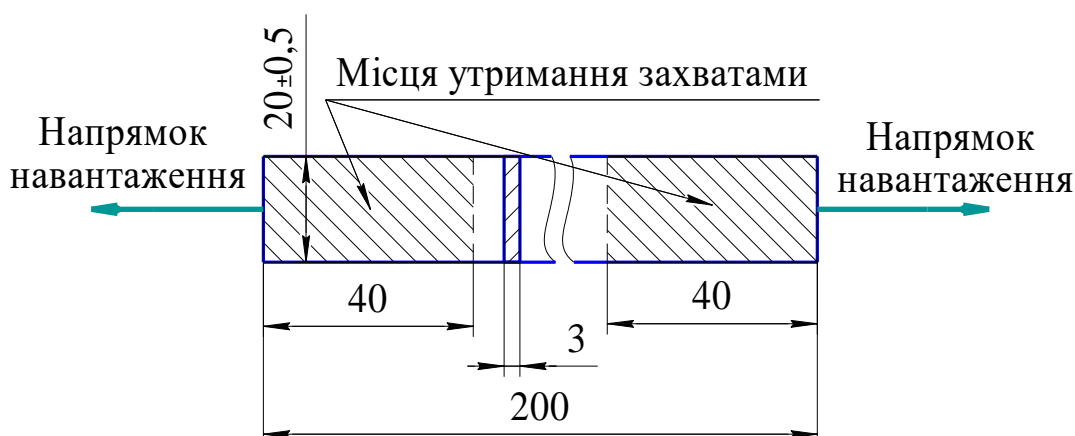


Рисунок 4.1 – Форма і розміри зразків, що використовувались під час досліджень

На рис. 4.2 зображено елементи каркасу кузова автобуса «Богдан» А092 2006 р. випуску, з яких вирізано дослідні зразки.

1. Повздовжній лонжерон із каркасу основи (біля місць кріплення пневморесор) труби профілем $140 \times 60 \times 3$ мм (№ 1).

2. Елементи каркасу бічних частин та дверних стійок труби профілем $40\times40\times2$ мм (№ 2, № 3, № 7).

3. Елементи каркасу бічних частин, що формують арку задніх коліс труби профілем $60\times40\times3$ мм (№ 4, № 5).

4. Швелер перерізом $100\times40\times3$ мм у районі кріплення силового агрегату перерізом $100\times40\times3$ мм (№ 6).

Зразок № 1 виготовлений зі Сталі 20, а інші – зі Сталі 10.



Рисунок 4.2 – Елементи каркасу кузова автобуса «Богдан» А092 2006 р. випуску, з яких вирізано дослідні зразки

Як видно (рис. 4.3) з елементів каркасу кузова відповідно вирізані дослідні зразки розміром 200×20 мм (рис. 4.3, а). Зразки вирізані з частин

обраних елементів кузова з мінімально можливим ступенем корозії та мінімальними деформаціями.

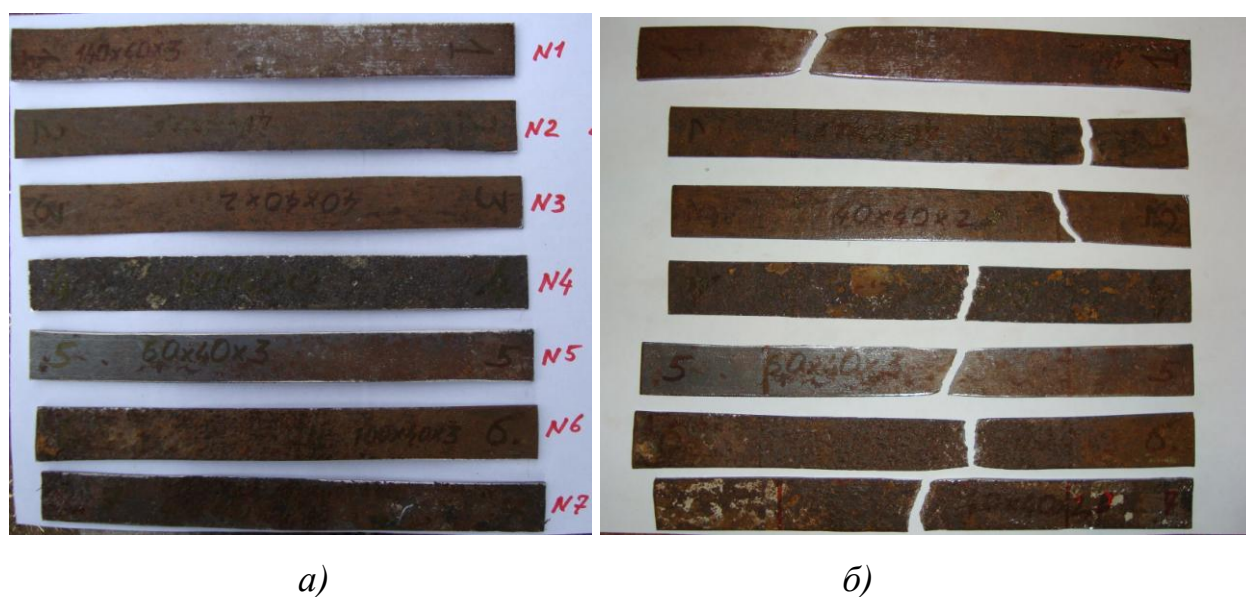


Рисунок 4.3 – Дослідні зразки: а) – до випробування на розрив; б) – після випробування на розрив

Випробування зразків проводились на розривній машині Р-5 згідно відомої методики [103], при якому визначаються діаграми розтягу.

За даними діаграм розтягу зразків визначаються такі механічні характеристики елементів каркасу кузова: межа текучості σ_T , напруження витривалості σ_B та відносне видовження δ .

Межа текучості визначається за формулою

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (4.1)$$

де F_0 – площа поперечного перерізу дослідного зразка;

P_T – зусилля розтягу зразка при текучості матеріалу.

Напруження витривалості визначається за формулою

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{P_{\max}}{F_0}, \quad (4.2)$$

де P_{\max} – максимальне зусилля при розтягу зразка.

Відносне видовження визначається з діаграми розтягу по осі видовження, що відповідає максимальному зусиллю P_{\max} .

Відносне видовження зразка визначається за формулою

$$\delta = \frac{\Delta l}{L} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

де Δl – збільшення довжини зразка при розтягу по осі видовження;

L – довжина зразка до випробування.

Властивості зразків порівнюються із властивостями нового матеріалу, з якого виготовляються відповідні елементи каркасу кузова [104]. При невідповідності заданим механічним властивостям такі елементи каркасу кузова вирізаються та замінюються повністю.

4.1.2 Результати випробування елементів труб каркасу кузова автобуса у процесі експлуатації

Отримання характеристик міцності труб каркасу кузова, які змінюються у процесі експлуатації, раціонально проводити під час ВР автобусів. Для проведення дослідження були вирізані дослідні зразки згідно (рис. 4.1). Вирізання зразків із рами не допускається.

Для визначення механічних властивостей елементів каркасу кузова було проведено випробування зразків на розривній машині Р-5 згідно ISO 6892 - 1:2019. На рис. 4.4 зображено випробування одного із фрагментів каркасу кузова восьмирічного автобуса «Богдан» А092 при пробігу 850 тис. км. Для проведення випробувань вирізано сім зразків елементів каркасу кузова.

Такі елементи каркасу кузова, як показує ремонтна практика, не замінюються під час ВР кузова.



Рисунок 4.4 – Випробування зразків елементів каркасу кузова на розривній машині Р-5 згідно ISO 6892-1:2019

У результаті випробувань отримано значення максимальних зусиль на розрив, самописцем побудовано відповідні діаграми розтягу (рис. 4.5) та визначено різницю довжин зразків до і після експерименту.

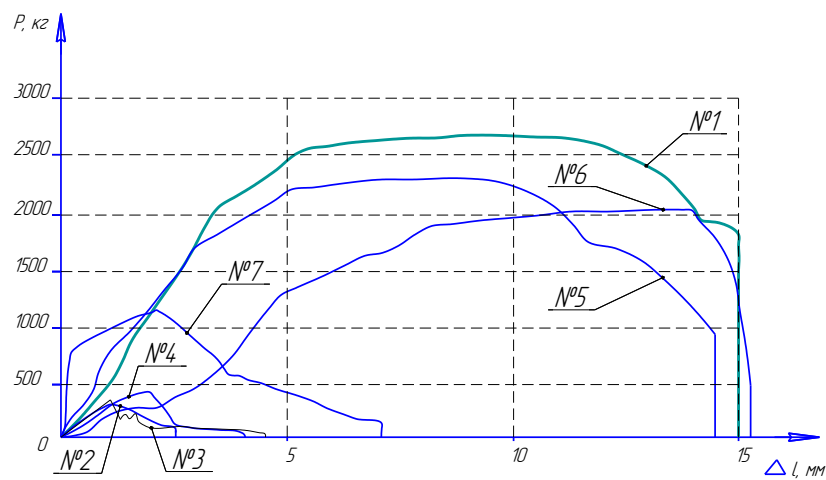


Рисунок 4.5 – Суміщена діаграма розтягу

Згідно отриманих діаграм (рис. 4.5) за формулами (4.1) – (4.3) розраховано механічні властивості зразків (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Порівняння матеріалу каркасу труб нового та восьмирічного автобуса

Показники	Властивості нового матеріалу [54]		Властивості старих елементів кузова						
	сталь 10	сталь 20	№ випробуваного зразка						
			1	2	3	4	5	6	7
σ_T , МПа	206	245	293	-	-	-	-	37	143
σ_B , МПа	321	412	373	191	102	175	249	299	294
δ , %	31	25	15	2	1	5	13	16	6

В табл. 4.1 для порівняння наведено марки сталі, з яких виготовляється каркас кузова (Сталь 10 та Сталь 20) та її основні характеристики.

Під час кожного ВР такі випробування фрагментів каркасу кузова дозволять отримати статистичні дані по втраті міцності елементів каркасу кузова залежно від термінів експлуатації та пробігу.

У всіх зразках (табл. 4.1) спостерігається погіршення механічних властивостей, тільки у зразка № 1 на 20% зросла границя текучості σ_T в результаті наклепу матеріалу під дією циклічних знакозмінних навантажень. Зменшення межі міцності σ_B всіх зразків на 7–8% пояснюється накопиченням втомних тріщин та осередків піттингової корозії. Крім того, у зразків № 2 – № 5 неможливо відслідкувати межу текучості, про що і свідчить зменшення відносного подовження δ в 1,7–31 разів.

Отже, експлуатація кузова з погіршенням механічних властивостей недопустима, оскільки такі матеріали не забезпечують кузову відповідність вимогам ПБ Правил ЄЕК ООН № 66 (107).

Ремонт кузова автобуса із заміною окремих елементів (із характерними пошкодженнями) не відновить фізико-механічні властивості каркасу, тому

доцільною буде заміна всіх елементів кузова нижче підвіконних брусів із застосуванням сучасних технологій АЗ та полімерних матеріалів. Така заміна потребує більших капіталовкладень, які окупляться більшими термінами експлуатації у порівнянні з «латковим» ремонтом.

При зрізанні зовнішнього облицювання кузова та знятті інших панелей виявлено значні площі деталей кузова без АЗ, тому своєчасна антикорозійна обробка кузова, а також додаткова обробка кузова нового автобуса дозволить підвищити корозійну стійкість.

4.1.3 Дослідження структури матеріалу елементів каркасу кузова, які не мають зовнішніх ознак руйнування

Для проведення експериментальних досліджень застосовується металографічний мікроскоп марки ММР-2Р (рис. 4.6), характеристики якого наведено в [105].



Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд металографічного мікроскопа ММР-2Р з допоміжним обладнанням під час експериментальних досліджень

Конструкція мікроскопа дозволяє здійснювати безпосередній перегляд зразків через оглядовий окуляр. При переключенні положення картина спостереження виводиться на екран ПК Lenovo Z580, на якому встановлено спеціальне ліцензійне програмне забезпечення. До ПК сигнал передається за допомогою камери марки Sven ПС-960 (2 Megapicse).

Експериментальні дослідження проводились у два етапи. На першому етапі дослідний зразок було підготовлено відповідно до вимог [105] без травлення та проведено перегляд під мікроскопом при 80-ти та 300-кратному збільшенні. На другому етапі зразок протравлено 4% розчином азотної кислоти згідно [105].

Враховуючи те, що автобуси малого класу «Богдан» займають на ринку України близько 50% [55], для проведення експериментальних досліджень обрано міський автобус «Богдан» А092 2006 р. випуску та пробігом 950 тис. км.

Основа каркасу кузова сприймає основну частину навантажень та є однією із відповідальних складових кузова, що забезпечують довговічність автобуса в цілому.

Для проведення експериментальних досліджень вирізано зразок в області втомної тріщини із лонжерона основи каркасу кузова поблизу пневморесори задньої підвіски (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – Частина лонжерона основи каркасу кузова обраного для досліджень

В цьому місці під час експлуатації автобуса постійно виникають знакозмінні навантаження, що призводять до накопичення втомних тріщин та корозійного розтріскування. Зразок вирізано таким чином, що можна оглядати утворену втомну тріщину та частину матеріалу, котрий візуально взагалі непошкоджений.

На рис. 4.8 показано місце, звідки вирізано зразок у збільшеному вигляді.



Рисунок 4.8 – Місце на лонжероні, звідки вирізаний зразок (у збільшеному вигляді)

Такий зразок згідно до вимог [105] було підготовлено до першої серії експерименту (очищений від іржі, прошліфований і відполірований) (рис. 4.9, *a*). Після першої серії експерименту зразок було протравлено згідно до вимог [105] (рис. 4.9, *б*).

Під час проведення експерименту було оглянуто всю площу поверхні досліджуваного зразка розмірами $60 \times 50 \times 3$ мм. При цьому зроблено понад 100 фотознімків.

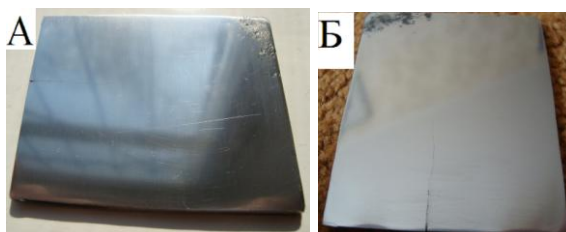


Рисунок 4.9 – Підготовлений зразок: *a*) – до першої серії експерименту (без травлення); *б*) – до другої серії експерименту (протравлений)

На основі експериментальних досліджень [106] при огляді непротравленого зразка встановлено наступне.

1. Поблизу видимої втомної тріщини спостерігаються непомітні неозброєним оком розгалуження втомних тріщин (рис. 4.10).

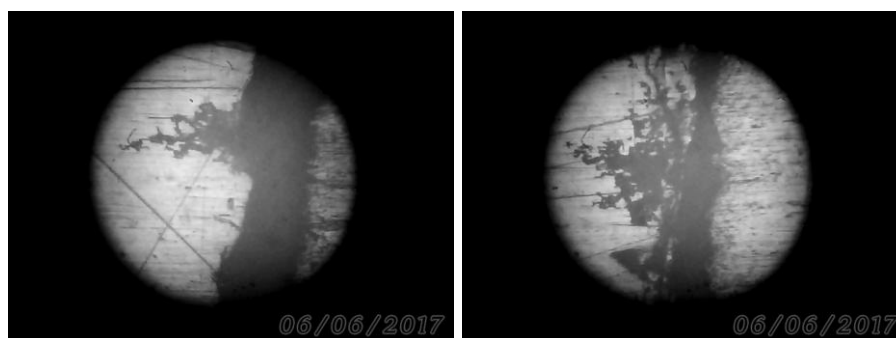


Рисунок 4.10 – Знімки зразка під мікроскопом (збільшено у 80 разів та виявлено розгалуження втомних тріщин, що візуально непомітні)

2. На поверхні, де візуально відсутні пошкодження, спостерігаються осередки утворення втомних тріщин по всій поверхні матеріалу. Спостерігається збільшення періодичності повторювання осередків до видимої втомної тріщини (рис. 4.11).

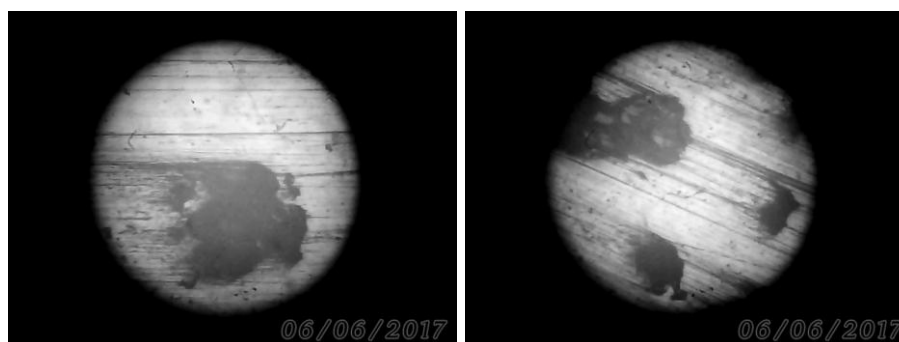


Рисунок 4.11 – Знімки зразка під мікроскопом (збільшено у 80 разів та виявлено осередки утворення втомних тріщин, що візуально непомітні)

3. Візуально непомітне продовження тріщини чітко спостерігається при 80-кратному збільшенні. При цьому видно, що вона з однієї розгалужується в декілька (рис. 4.12).

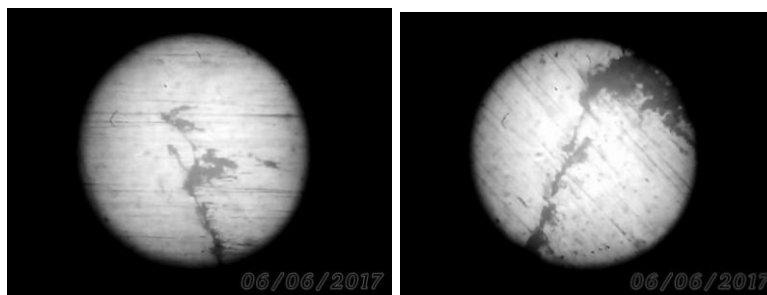


Рисунок 4.12 – Знімки зразка під мікроскопом (збільшено у 80 разів та виявлено продовження втомної тріщини, яке непомітне без мікроскопа)

Після протравлення зразка стало можливим спостерігати його структуру. Таким чином встановлено наступне.

1. Спостерігається періодичне змінання включень матеріалу (рис. 4.13).

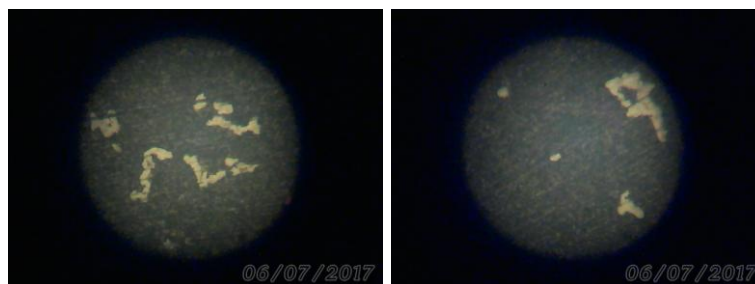


Рисунок 4.13 – Знімки зразка під мікроскопом (збільшено у 300 разів та виявлено змінання включень матеріалу)

2. Повторюваність зміни структури спостерігається по всій поверхні матеріалу та має максимальні значення поблизу утворення втомної тріщини.
3. Спотворення структури матеріалу дозволяє спрогнозувати утворення та подальший розвиток втомних тріщин.

Тож дослідження зразків за допомогою металографічного мікроскопа пояснюють погіршення механічних властивостей елементів каркасу кузова. Враховуючи погіршення фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова та утворення візуально непомітних осередків накопичення корозійного розтріскування, такий «ВР» не забезпечить повноцінне відновлення міцності

каркасу кузова. Як результат, такий автобус не буде відповідати нормам ПБ згідно Правил ЄЕК ООН № 66 та № 107. Доцільною буде заміна всіх елементів кузова нижче підвіконних брусів із застосуванням сучасних технологій АЗ та полімерних матеріалів [107]. Така заміна потребує більших капіталовкладень, які окупляться більшими термінами експлуатації у порівнянні з «латковим» ремонтом, а також буде забезпечена відповідність нормам ПБ.

4.2 Оцінка критичного стану каркасу кузова з умов пасивної безпеки і міцності

Для оцінки критичного стану каркасу кузова з умов міцності було розроблено методологію прогностичної оцінки довговічності автобусів, реалізовано її в програмному середовищі Matlab Simulink (розділ 3). Для перевірки на адекватність реалізованої математичної моделі в програмному середовищі Matlab Simulink необхідно провести дорожні випробування автобуса. Метою досліджень є проведення дорожніх випробувань автобуса та перевірка на адекватність реалізованої математичної моделі. Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести підготовку спеціального обладнання для дорожніх випробувань автобуса;
- за допомогою спеціального обладнання провести дорожні випробування автобуса та визначити відносні деформації елементу каркасу кузова в обраному перерізі при заданих режимах руху;
- перевірити на адекватність розроблений програмний комплекс у програмному середовищі Matlab Simulink відповідно реальній експлуатації автобуса.

4.2.1 Підготовка обладнання для дорожніх випробувань автобуса

4.2.1.1 Розробка приладу для вимірювання деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах

Під час підготовки спеціального обладнання для дорожніх випробувань автобуса потрібно розробити, виготовити, відтарувати та перевірити на працездатність спеціальний автономний прилад для вимірювання відносних деформацій у досліджуваному перерізі каркасу кузова. На шляху потрібної розробки на сучасному етапі стає розвиток електроніки та мікропроцесорної техніки, що дозволяє впроваджувати нові засоби діагностики та досліджень дорожніх транспортних засобів. Тенденції розвитку електронних засобів спрямовані на розробку універсальних схем, що дозволяють компонувати прилади з різноманітним спектром задач. Таким чином сучасні засоби електроніки дозволяють створити прилади нової мобільної конструкції для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору. Існуючі прилади для вимірювання деформацій [108] використовують мостову схему вимірювальних тензорезисторів. Прилади описані в літературі [108], забезпечують виконання вимірювальних операцій, що відповідають вимогам своєї сучасності. Однак на сьогодні це обладнання застаріле і має ряд недоліків: громіздкість, недостатня віброзахищеність, що не підходить для дослідження транспортних засобів, порівняно низька швидкодія, висока маса, а також необхідність у ручному балансуванні вимірювального мосту. Один із відомих сучасних приладів для вимірювання деформацій Zetlab [108] позбавлений недоліків застарілих приладів [108], однак має порівняно високу вартість, енергоємність (потребує додаткове джерело живлення 220 або 12 В) та складність системи. Крім того даний прилад уже на сьогоднішньому етапі має досить низьку передачу сигналу (до 20000 Гц), що може не забезпечити належну передачу інформації при дорожніх випробуваннях транспортного засобу з високими швидкостями руху та дорожнього покриття змінного профілю (бруківка, дороги низької якості). Сучасні блочні засоби електронної техніки [109] дозволяють реалізувати максимальну швидкодію при мінімальному енергоспоживанні. На основі даних блоків реалізовано стаціонарні ваги з виведенням інформації на монітор персонального комп'ютера (ПК), що складаються з мікроконтролера, підсилювача (коефіцієнт

підсилення 128), аналого-цифрового перетворювача (АЦП) без захисного екрану та з тензодатчиком, в якому використовуються тензорезистори номіналом 1 кОм, з'єднані за мостовою схемою. Однак дана конструкція має низьку завадостійкість та неузгодженість із тензорезисторами інших номіналів (для тензометрування елементів каркасу кузова застосовуються резистори опором 200 Ом) [108], що не забезпечить нормальну роботу при дорожніх випробуваннях транспортного засобу. Функціональність сучасних блочних схем розширюється при програмуванні мікроконтролерів під конкретні задачі в сучасному програмному середовищі Java, C++ тощо [110]. Враховуючи різноманіття блочних універсальних схем, на базі яких можливе створення практично будь-яких електронних приладів, виникли передумови для розробки комплексу для вимірювання деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах. При цьому слід створити такий комплекс, в основі якого буде прилад для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору. Прилад повинен бути доступним, мати низьку собівартість, високу швидкість передачі та обробки сигналу. Враховуючи те, що автобус є підвищеним джерелом радіозавад та вібрацій, створюваний прилад повинен мати високу вібро- та завадостійкість.

Прилад для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса було розроблено на основі плати мікроконтролера Arduino Mega 2560 та АЦП з підсилювачем на мікросхемі НХ711 із захисним завадопоглинаючим металевим екраном. Коефіцієнти підсилення даного підсилювача складають 32, 64 та 128. Ці значення встановлюються програмним шляхом та подачею сигналу з тензорезисторів на потрібний вхід. Для коректної роботи експериментальним шляхом підібрано коефіцієнт підсилення 32.

Схема розробленого приладу для вимірювання деформації показана на рис. 4.14. Прилад для вимірювання деформації містить ПК типу Notebook 1, з'єднувальний USB кабель 2, плату мікроконтролера Arduino Mega 2560 3, АЦП з мікросхемою НХ711 4, стабілізатор напруги на 3,3 В на базі мікросхеми AMS1117 5, компенсаційні резистори мостової вимірювальної схеми 6, волого-

віброзахисний роз'єм 7, екрановані з'єднувальні провідники 8, вимірювальні тензорезистори мостової схеми 9, додатковий захисний екран 10 для підвищення завадостійкості АЦП з підсилювачем, екранований корпус 11, віброопори 12, з'єднувальні провідники 13.

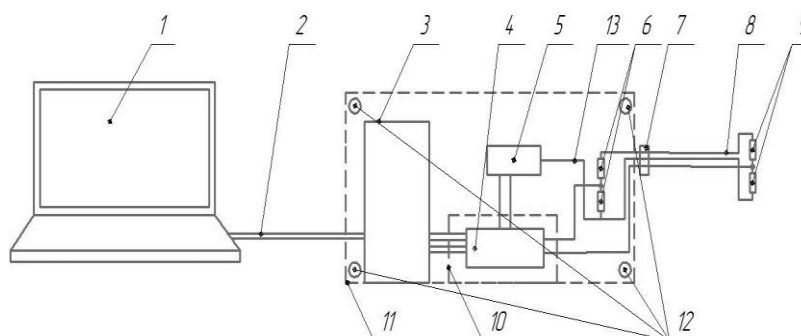


Рисунок 4.14 – Схема приладу для вимірювання деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах

Для роботи приладу розроблено програмне забезпечення в середовищі С++ та запрограмовано плату мікроконтролера. На рис. 4.15 зображено основний блок приладу для вимірювання деформації елементів каркасу кузова без верхньої кришки.



Рисунок 4.15 – Прилад для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору

Всі елементи розробленого пристрою поміщено в корпус із екранованого матеріалу, що виготовлений із пластику з двостороннім алюмінієвим покриттям. Всі мінусові складові блоків заземлені на корпус і з'єднані між собою та екраном з'єднувальних провідників.

Робота приладу для вимірювання деформації відбувається наступним чином. При запуску системи вимірювання в автоматизованому режимі проводиться балансування вимірювального мосту із затримкою 2000 мс для прогріву тензорезисторів. Вимірювання деформацій проводиться у одиницях відносної деформації (овд).

Перед початком випробування наклеюються тензодатчики у місцях, що підлягають дослідженню, припаюються до з'єднувальних провідників, ізолюються, герметизуються та дається витримка часу для повного висихання. Тензорезистори наклеюються клеєм з мінімальним значенням повзучості [108] (наприклад Loctite 4208). Вимірювальний прилад підключається до ПК 1 через кабель 2. Екранований провідник 8 з'єднується з роз'ємом 7. Корпус приладу – з масою автобуса. Потім включається графічний інтерфейс системи контролю деформації та проводиться встановлення «нуля» вимірювання в автоматичному режимі. Тільки після встановлення системи в «нуль» потрібно завантажити баласт в автобус (величина баласту вибирається залежно від методики дослідження). Живлення приладу здійснюється через порт USB ПК 1 та не потребує додаткового джерела.

В процесі вимірювання деформації з вимірювального мосту надходить напруга до підсилювача та АЦП 4, а далі цифровий сигнал надходить до цифрових входів плати 3. З плати мікроконтролера 3 сигнал передається через кабель 2 на порт USB ПК 1.

Після проведення вимірювання інтерфейс закривається та відключається вимірювальний прилад від ПК.

Розроблений прилад для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса забезпечує швидкодію передачі сигналу з частотою до 15 МГц,

високу завадостійкість та вібростійкість, низьке енергоспоживання та собівартість.

4.2.1.2 Тарування приладу для вимірювання деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах

Тарування приладу було здійснено з використанням спеціального пристосування з гвинтовим пресом (рис. 4.16).

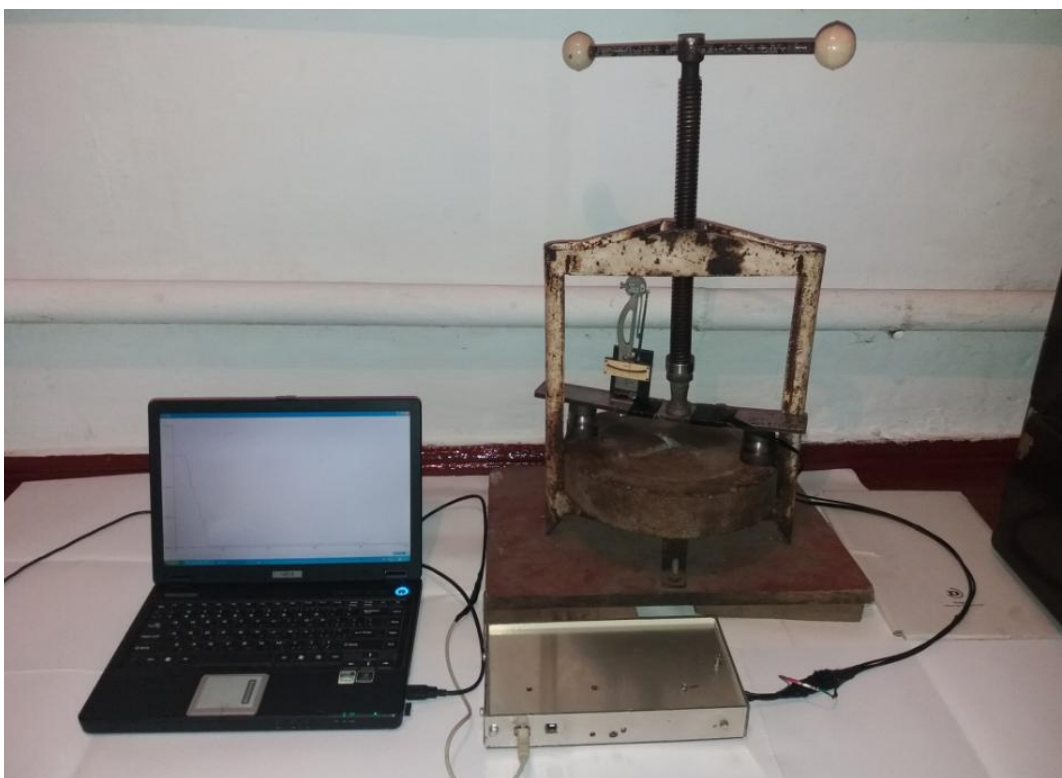


Рисунок 4.16 – Пристосування для калібрування приладу для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору

Тензорезистори наклеюються на спеціально виготовлену пружну балку, з розмірами $500 \times 40 \times 10$ мм. Матеріал балки – Сталь 65Г. Виводи тензорезисторів з'єднуються за мостовою схемою у відповідності до резисторів розміщених в корпусі основного блока приладу за допомогою екранованих провідників. Тарувальна балка встановлюється на двох опорах по центру під гвинтом пресу

(рис. 4.16). До балки навпроти наклеєних тензорезисторів кріпиться механічний тензометр Гугенбергера за допомогою спеціальної струбцини. База тензометра рівна базі наклеєних тензорезисторів і дорівнює 20 мм. Тому тензометр встановлюється так, щоб бази тензометра і тензорезисторів чітко співпадали. Похибка механічного тензометра складає 15 оvd.

Зміна ступеню деформації здійснюється із чергуванням через кожні 50 оvd, від 0 до 3000 оvd. Отримані під час тарування покази тензометра Гугенбергера та покази на моніторі вносяться до таблиці. На основі табличних даних отримано тарувальні коефіцієнти та внесені до програми, що записана в мікроконтролер.

Навантаження поступово збільшувалось таким чином, щоб видовження Δl змінювалось від 0,001 мм до 0,05 мм із кроком 0,001 мм. Відповідно реєструвались дані на моніторі персонального комп'ютера (ПК) значення відносної деформації ε в одиницях відносної деформації

$$\varepsilon = \Delta l / l, \quad (4.4)$$

де Δl – лінійне видовження матеріалу, мм;

l – база вимірювання, мм; $l = 20$ мм (для тензорезисторів та тензометра Гугенбергера однакова).

У результаті чого було відслідковано лінійність відхилення показників в усьому діапазоні вимірювання. Відповідно внесено калібрувальний коефіцієнт до програми управління та запрограмовано мікроконтролер.

Після калібрування даний дослід було проведено з трьома повтореннями для перевірки калібрування приладу (табл. 4.2) із видовженням від 0 до 0,032 мм.

Дані отримані в табл. 4.2 показують, що прилад для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору забезпечує вимірювання з належною точністю.

Таблиця 4.2 – Порівняльні результати калібрування приладу для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору

Покази тензометра Гугенбергера Δl , мм	Розраховане значення відносного видовження за даними тензометра Гугенбергера ϵ , овд	Покази виведені на монітор ПК ϵ , овд			Максимальне відхилення, овд
		№ 1	№ 2	№ 3	
0,001	50	68	52	51	16
0,002	100	117	103	104	17
0,003	150	177	149	156	27
0,004	200	224	195	197	24
0,005	250	268	241	247	18
0,006	300	317	300	301	17
0,007	350	364	330	337	14
0,008	400	416	415	406	16
0,009	450	470	460	449	20
0,01	500	512	490	488	12
0,011	550	571	555	545	21
0,012	600	620	605	592	20
0,013	650	682	653	648	32
0,014	700	721	717	697	21
0,015	750	774	720	750	30
0,016	800	810	796	801	10
0,017	850	840	873	856	23
0,020	1000	1033	1016	999	33
0,025	1250	1237	1229	1276	26
0,026	1300	1308	1324	1318	24
0,030	1500	1536	1534	1529	34
0,032	1600	1605	1616	1618	18

4.2.1.3 Перевірка працездатності приладу для вимірювання деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах

Потім для перевірки працездатності приладу для вимірювання деформацій труб каркасу кузова автобуса взято зразки тих самих труб, з яких виготовляється каркас кузова на АТ «Черкаський автобус» розмірами: $40 \times 40 \times 2,0$ мм, $60 \times 40 \times 3,0$ та $140 \times 60 \times 3,6$ мм. На ці труби приклеєні тензорезистори відповідно до тарування та випробувань деформацій кузова – по одному тензорезистору на протилежних сторонах профілю труби навпроти один одного.

Дослідження проводились у лабораторії опору матеріалів Черкаського державного технологічного університету. Деформація зразків труб проводилась на гідравлічному пресі 2ПГ-125 [111], з максимально можливим навантаженням 125 т, в лабораторних умовах (рис. 4.17).



Рисунок 4.17 – Загальний вигляд пресу гідравлічного 2ПГ-125

Прес 2ПГ-125 має два робочих діапазони прикладання навантажень: до 40 т та до 125 т. Дослідження проводились в діапазоні до 40 т.

Навантаження на кожен зразок здійснювалось по кількох точках. Кожний зразок встановлювався на дві опори із радіусними контактуючими поверхнями. Відстань між опорами (база) була наступною для зразків: $40 \times 40 \times 2,0$ мм – 475 мм, $60 \times 40 \times 3,0$ мм – 490 мм та $140 \times 60 \times 3,6$ мм – 470 мм. Між рухомою плитою пресу та досліджуванним зразком встановлювалася проставка для концентрації зусилля по центру зразка та можливості розміщення тензометра Гугенбергера.

На рис. 4.18 наведене діагностичне обладнання для проведення експериментальних досліджень.



Рисунок 4.18 – Діагностичне обладнання під час лабораторних випробувань

На рис. 4.19 наведено фото, що зроблене під час випробування зразка труби $60 \times 40 \times 3,0$ мм каркасу кузова.



Рисунок 4.19 – Випробування зразка труби $60 \times 40 \times 3,0$ мм

Деформація зразків проводилась до появи текучості матеріалу, за межами якої вже не буде справедливий закон Гука. В результаті лабораторних випробувань встановлено, що в межах дії закону Гука покази механічного тензметра відповідають значенням, що виводяться на монітор ПК. Отже, точність вимірювання розробленого приладу лежить у межах похибки механічного тензметра та максимальне відхилення не перевищує 15 оvd. Відповідно тензотрування елементів каркасу кузова буде лежати в межах отриманих похибок, що і забезпечить достовірність вимірювання. Результати вимірювань зведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати лабораторних випробувань зразків труб, з яких виготовляється каркас кузова автобуса

Покази тензометра Гугенбергера Δl , мм	Прикладене зусилля P , кг	Розраховане значення відносного видовження за даними тензометра Гугенбергера ε , овд	Покази виведені на монітор ПК ε , овд	Максимальне відхилення, овд
Зразок труби профілем 40×40×2,0 мм				
0,007	340	350	322	28
0,016	680	800	816	16
0,020	850	1000	1042	42
0,029	1275	1450	1451	1
0,032	1530	1600	1632	32
Зразок труби профілем 60×40×3,0 мм				
0,003	340	150	152	2
0,007	595	350	337	13
0,015	680	750	744	6
0,037	3400	1850	1881	31
0,042	3740	2100	2108	8
Зразок труби профілем 140×60×3,6 мм				
0,001	340	50	51	1
0,002	850	100	98	2
0,006	4250	300	286	14
0,011	7990	550	537	13

Вимірювальний комплекс, що складається з розробленого приладу для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою

зміни деформаційного опору та діагностичного приладу G-IDSS, дозволяє проводити дослідження та виконувати синхронний запис отриманих результатів. Основними перевагами розробленого приладу є: доступність, компактність, вібростійкість, завадостійкість, простота налаштування, автоматичне балансування вимірювального мосту, низьке енергоспоживання та відсутність потреби у додатковому джерелі живлення, що і підтверджує доцільність даної розробки. Враховуючи ряд переваг, вимірювальний комплекс дозволяє проводити випробування автобуса на реальному маршруті при постійному русі пасажиропотоку. Отримані результати досліджень, при фіксації швидкісних режимів із одночасною фіксацією деформацій елементів каркасу кузова автобуса, можуть бути використані для отримання статистичних даних та імовірності виникнення навантажень різних величин. На основі цих досліджень можна адекватно розрахувати довговічність каркасу кузова автобуса до заданих умов експлуатації. При зміні тензорезисторів на інші (навіть при використанні таких самих номіналів, але з іншої партії), а також інших чинників, що можуть вплинути на зміну параметрів вимірювання, потрібно обов'язково провести тарування приладу за представленою методикою.

4.2.1.4 Дорожні випробування автобуса

Під час дорожніх випробувань автобуса за допомогою спеціального обладнання визначалися відносні деформації елемента каркасу кузова в обраному перерізі при заданих режимах руху.

Об'єктом дорожніх досліджень був автобус «Атаман» А09216 (VIN: Y7BA09216KB000308) 2019 року випуску, з пробігом 2654 км (рис. 4.20), що виготовляється АТ «Черкаський автобус». Дослідження проводились у рамках заводських періодичних випробувань пробігом 3000 км.

Під час дослідження деформацій в елементах каркасу кузова автобуса важливо також вимірювати швидкість автобуса із заданою точністю, що не можна отримати при фіксації показів штатного спідометра. При цьому важливо

отримувати діаграми: розгону, сповільнення, екстреного гальмування та паралельно записувати величину деформацій. Фіксація показів спідометра за допомогою відеокамери, при неналежній точності, ще і ускладнює обробку отриманої інформації.



Рисунок 4.20 – Автобус «Атаман» А09216, на якому проводились дорожні випробування

Для вимірювання швидкості руху автобуса, запису інформації в комплексі з розробленим приладом, ефективно буде працювати спеціальний діагностичний прилад G-IDSS [112] із ліцензійним програмним забезпеченням для діагностики автобусів на агрегатній базі Isuzu (рис. 4.21).



Рисунок 4.21 – Діагностичне обладнання під час дорожніх випробувань

Діагностичний прилад G-IDSS збирає дані з чотирьох датчиків системи ABS та показує швидкість на кожному колесі автобуса. Для контролю швидкості автобуса автоматично обчислюється середнє значення за результатами фіксації віх чотирьох датчиків, що виводиться на монітор ПК у вигляді числових значень та часових діаграм. Програмне забезпечення G-IDSS дозволяє записувати в реальному часі будь-які діагностичні параметри, в тому числі й швидкість руху автобуса. Таким чином одночасний запис величини деформації досліджуваних елементів каркасу кузова автобуса за допомогою розробленого приладу та запис швидкості автобуса стандартним діагностичним приладом G-IDSS дозволяють коректно та достовірно отримувати результати дослідження.

Тензорезистори було приклеєні на лівому лонжероні, перерізом $140 \times 60 \times 3,6$ мм, каркасу основи за заднім кріпленням передньої ресори (рис. 4.22).



Рисунок 4.22 – Місця розміщення тензорезисторів

Таке розміщення тензодатчиків обумовлене тим, що дорожні випробування проводились без навантаження (водій-випробувач, експериментатор та діагностичне обладнання) і центр мас автобуса відповідно зміщений до передньої осі. Крім того таке розміщення тензорезисторів дозволяє порівняти результати із автобусом «Атаман» А092Н6, у якого в задній частині низька підлога та права послаблена боковина дверними проймами. Тому передня частина лівого лонжерону автобусів А092Н6 та А09216 будуть працювати в рівноцінних умовах.

Дослідження проводились при наступних дорожніх умовах та режимах експлуатації:

- рівномірний рух зі швидкістю 30 км/год (рис. 4.23);
- рівномірний рух зі швидкістю 50 км/год (рис. 4.24);
- рівномірний рух зі швидкістю 70 км/год (рис. 4.25);
- рух по дорозі низької якості зі швидкістю 30 км/год (рис. 4.26);
- рух «змійкою» (періодична зміна полоси руху) (рис. 4.27);

– екстрене гальмування (рис. 4.28).

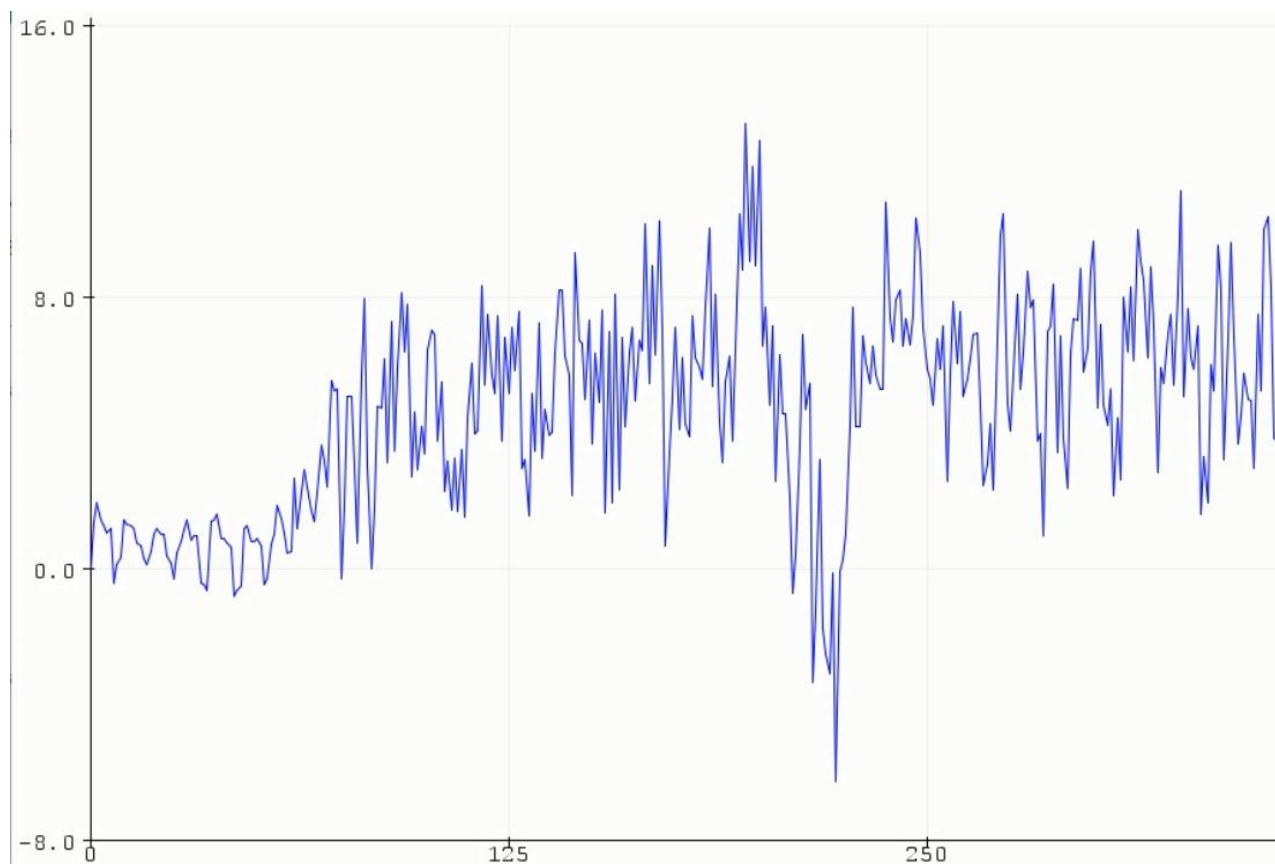


Рисунок 4.23 – Залежність величини відносних деформацій ε (в одиницях відносної деформації (овд)) від часу руху (в секундах (с)) при швидкості 30 км/год під час випробування автобуса на дорозі I-ї категорії (починаючи від значення 125 по осі абсцис)

Із рис. 4.23 видно, що при швидкості 30 км/год та русі на дорозі I-ї категорії, що відповідає мікропрофілю асфальто-бетонного покриття значення деформацій кузова в досліджуваному перерізі лежать у межах від -8 до 16 овд. Такі незначні деформації не виходять за межі допустимого діапазону деформацій, що призвели б до накопичення осередків втомного руйнування.

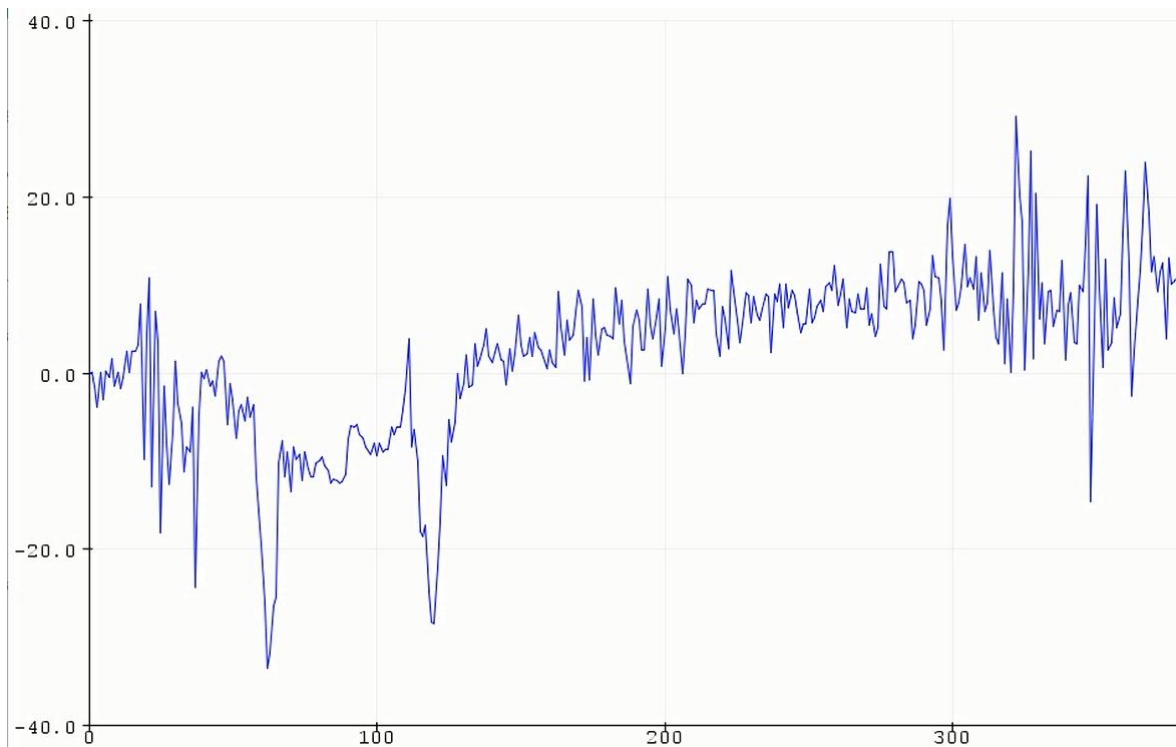


Рисунок 4.24 – Залежність величини відносних деформацій ε (в одиницях відносної деформації (овд)) від часу руху (в секундах (с)) при швидкості 50 км/год під час випробування автобуса на дорозі I-ї категорії (починаючи від значення 150 по осі абсцис)

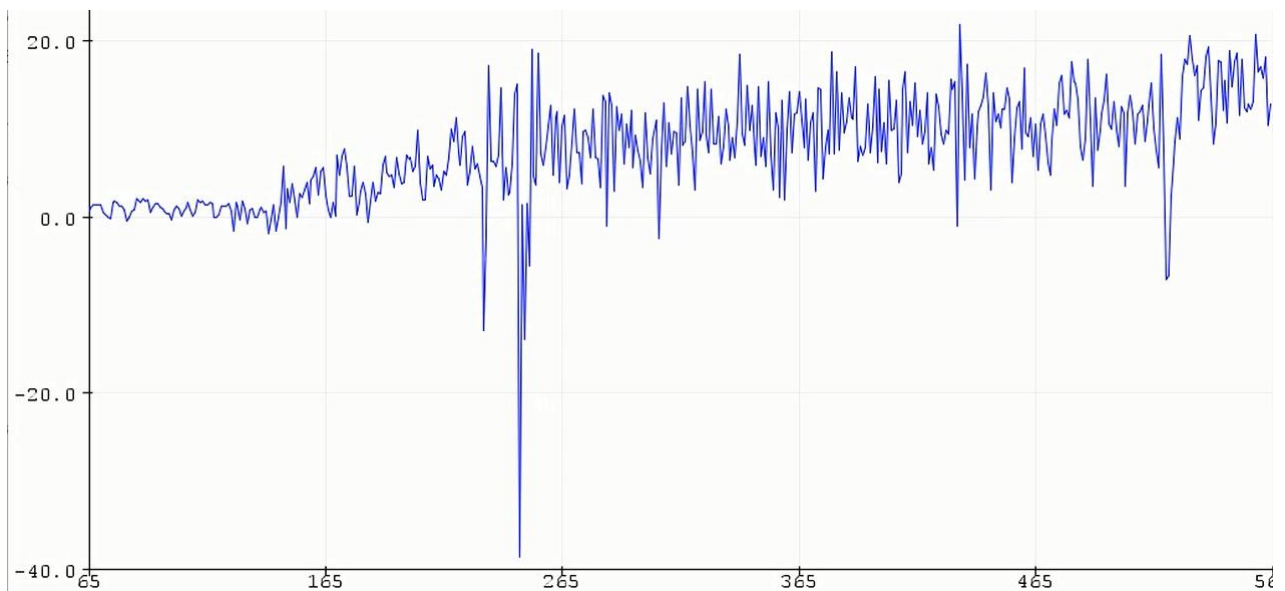


Рисунок 4.25 – Залежність величини відносних деформацій ε (в одиницях відносної деформації (овд)) від часу руху (в секундах (с)) при швидкості 70 км/год під час випробування автобуса на дорозі I-ї категорії (починаючи від значення 265 по осі абсцис)

Із рис. 4.23 – 4.25 видно, що при збільшенні швидкості руху автобуса на дорозі I-ї категорії частота впливу від мікропрофілю дороги зростає, при чому амплітуда дії від мікропрофілю дороги не перевищує значення відносних деформацій, що впливають на утворення осередків втомного руйнування.

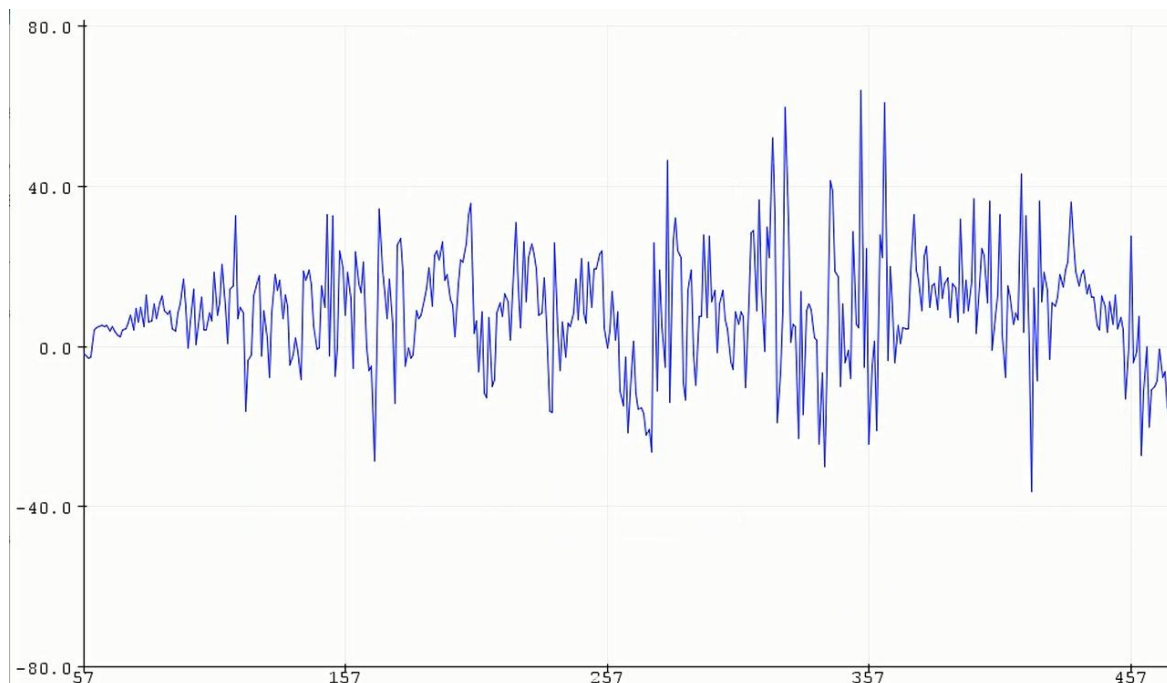


Рисунок 4.26 – Залежність величини відносних деформацій ε (в одиницях відносної деформації (овд)) від часу руху (в секундах (с)) при швидкості 30 км/год під час випробування автобуса на дорозі низької якості (з вибоїнами)

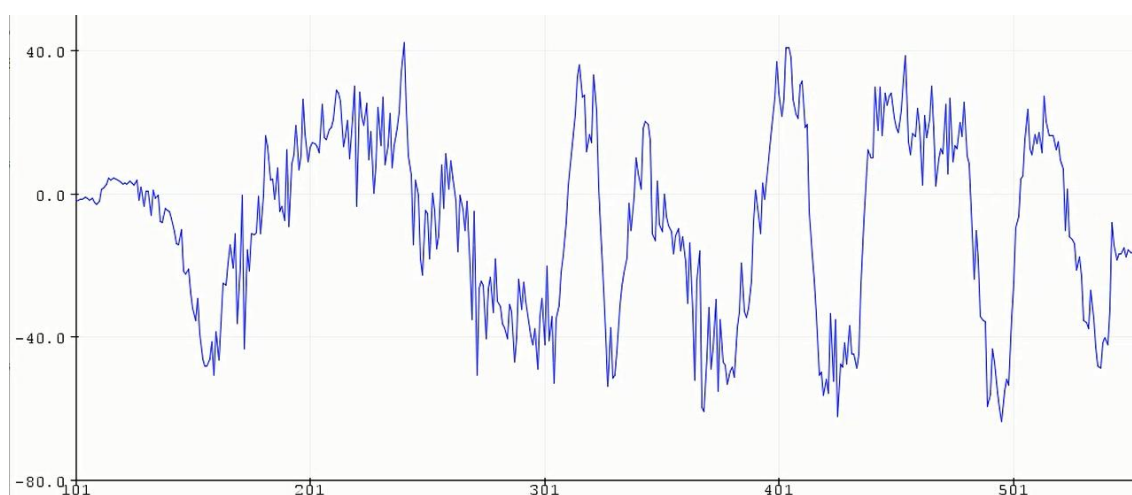


Рисунок 4.27 – Залежність величини відносних деформацій ε (в одиницях відносної деформації (овд)) від часу руху (в секундах (с)) під час випробування автобуса на дорозі I-ї категорії при виконанні маневру «змійка»

Як видно із рис. 4.26, що при русі зі швидкістю 30 км/год на дорозі із вибоїнами при спорядженій масі автобуса спостерігається деяке зростання відносних деформацій у досліджуваному перерізі від -40 до 70 овд. При русі по дорогах низької якості зі швидкістю 30 км/год поштовхи від мікропрофілю дороги будуть створювати деформації, що більші в 2–3 рази у порівнянні з мікропрофілем дороги I-ї категорії при швидкості 70 км/год. При цьому однак деформації в досліджуваному перерізі не виходитимуть за допустимі межі утворення осередків втомного руйнування.

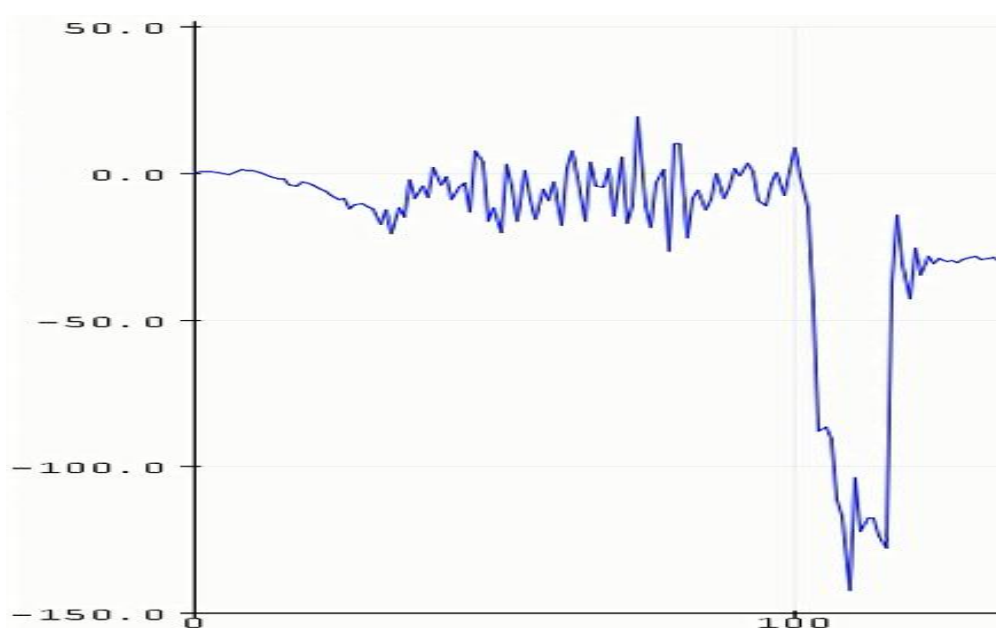


Рисунок 4.28 – Залежність величини відносних деформацій ε (в одиницях відносної деформації (овд)) від часу руху (в секундах (с)) під час випробування автобуса на дорозі I-ї категорії при виконанні екстреного гальмування зі швидкості 55 км/год (починаючи від значення 100 по осі абсцис)

На основі отриманих графічних залежностей визначаються максимальні значення відносних деформацій.

За законом Гука [113], можна визначити напруження в досліджуваному елементі каркасу кузова

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (4.5)$$

де E – модуль Юнга (для Сталі 20 $E = 2,12 \cdot 10^5$ МПа) [48];

ε – відносна деформація, отримана під час досліджень.

Провівши розрахунки, отримано ряд максимальних напружень за результатами дорожніх випробувань.

Максимальне напруження на дорозі I-ї категорії: при швидкості 30 км/год складає 1,6 МПа, при швидкості 50 км/год – 2,1 МПа, при швидкості 70 км/год – 3,6 МПа. При русі по дорозі з вибоїнами та при швидкості 30 км/год напруження складає 11,6 МПа, при русі з періодичною зміною полоси руху напруження – 11,8 МПа, при екстремому гальмуванні – 29,8 МПа. Слід підкреслити, що такі напруження виникають при спорядженій масі та без урахування знакозмінних навантажень при наповненні салону пасажирями, переміщенням пасажирів по салону та виходу їх з автобуса. При повній масі та перевантаженнях автобуса напруження в каркасі кузова можуть зростати до величин, що супроводжуватимуться інтенсивному накопиченню осередків втомного руйнування. Перевантаження та рух по дорогах низької якості може призвести з часом до руйнувань каркасу в слабких місцях.

Отже, у результаті проведення дорожніх випробувань визначено напруження при спорядженій масі автобуса в експлуатаційних умовах, які досягають 29,8 МПа. При цьому неминуче зростання напружень при збільшенні навантажень та руху по дорогах низької якості та нерівномірному русі, особливо при екстремому гальмуванні. Дослідження зміни напружень в елементах каркасу кузова при максимальному навантаженні (або і перевантаженні, враховуючи реалії експлуатації при гонці перевізників за прибутком) будуть обов'язковими під час підготовки до випуску нових моделей автобусів на АТ «Черкаський автобус». Провівши дорожні випробування автобуса за відпрацьованою методикою на реальних маршрутах, можна отримати комплекс напружень у проблемних (найбільш навантажених) елементах каркасу кузова. На основі таких дорожніх випробувань можна спрогнозувати ресурс каркасу кузова автобуса, що обмежується появою

втомних тріщин основи. Результати проведених досліджень дозволять підтвердити адекватність математичної моделі по розрахунку довговічності автобусів.

4.2.1.5 Перевірка на адекватність розробленого програмного комплексу в програмному середовищі Matlab Simulink відповідно до реальної експлуатації автобуса

Для підтвердження адекватності моделювання в середовищі Matlab Simulink було отримано часову діаграму зміни деформацій лонжерону каркасу основи ε_i (рис. 4.29, *a*) в одному з проблемних місць: за заднім кронштейном кріплення передньої лівої ресори на трубі каркасу основи (переріз $140 \times 60 \times 3,6$ мм) на відстані 1000 мм від осі передніх коліс (рис. 3.3, т. 1), при швидкості 70 км/год, при спорядженій масі на дорозі 1-ї категорії (взято параметри мікропрофілю для асфальтобетонного покриття). За результатами проведення дорожніх випробувань автобуса (рис. 4.25) в тому самому місці (п. 1 на рис. 3.3) при таких же самих умовах показано фрагмент (рис. 4.29, *б*), що і відповідає моделюванню в середовищі Matlab Simulink (рис. 4.29, *a*).

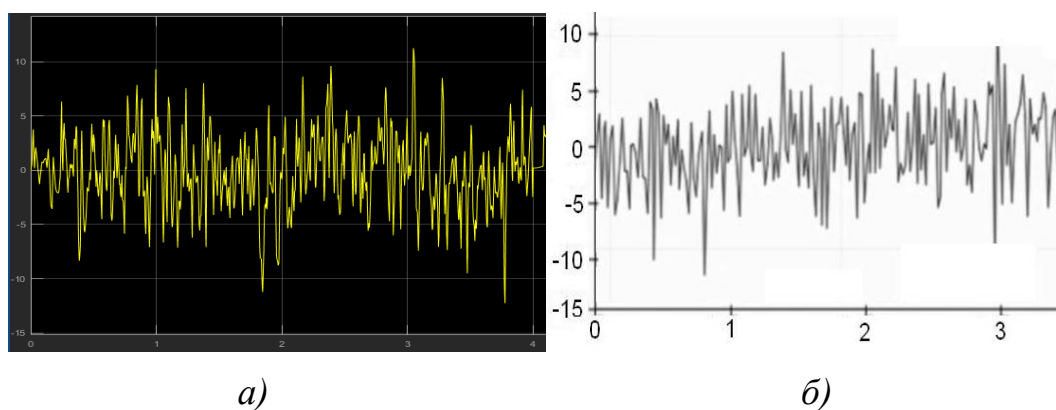


Рисунок 4.29 – Часові діаграми зміни деформацій лонжерону каркасу основи ε_i у одиницях відносної деформації (овд): *a*) – під час моделювання; *б*) – під час дорожніх випробувань

З рис. 4.29, *а* та 4.29, *б* видно, що результати моделювання та дорожніх випробувань лежать в одних і тих межах, що і підтверджує адекватність розробленої моделі на даному етапі моделювання.

4.3 Методичні засади відновлювальних ремонтів

4.3.1 Існуючі відновлювальні ремонти силами автотранспортних підприємств

Як показують реалії експлуатації автобусів, у більшості випадків (для економії коштів) фахівці АТП самостійно проводять ВР кузова (скоріше «косметичні» ремонти). В гіршому випадку просто заварюють тріщини, що неминуче призводить до повторних дефектів (рис. 4.30).



Рисунок 4.30 – Повторне руйнування лонжеронів каркасу основи профілю 140×60×3 мм автобуса «Богдан» А092 після заварювання втомної тріщини

В основному автобуси ставлять для проведення першого ВР при пробігу 800 тис. – 1 млн км та терміном експлуатації 9–11 років. Під час такого ВР проводиться ремонт або заміна агрегатів та «ВР» самого кузова. При цьому автобус підлягає мийці, розбиранню та дефектації. Таким чином можна провести і дефектацію кузова. Із кузова автобуса знімається обшивка підлоги, під якою відкриваються непомітні ззовні осередки корозії. Також відкривається

доступ для пошуку розвинених втомних тріщин. Далі для повноцінного виявлення дефектів зрізують бічні панелі, а інколи знімають приклеєні пластикові панелі (при наявності). У результаті такого розбирання відкриваються закриті місця, що мають суттєві корозійні пошкодження.

Після виявлення дефектів вирізаються пошкоджені сталеві труби каркасу основи, боковин і т. д. На їх місця уварюються нові (рис. 4.31).



Рисунок 4.31 – Відновлення каркасу основи кузова автобуса

Потім каркас очищується механічним або/та хімічним способами та покривається грунтом. У місцях приварювання зовнішніх панелей наноситься струмопровідний грунт (аналогічно технології АТ «Черкаський автобус»). При цьому вварюються нові панелі облицювання, оскільки старі, у місцях контакту із каркасом кузова, майже до наскрізних дірок ушкоджені корозією. Аналогічна картина спостерігається із самими трубами каркасу кузова.

Після зварювання кузов підлягає підготовці та антикорозійній обробці: покриття грунтом та емаллю. Сталеві елементи днища покривають антикорозійною вібростійкою мастикою, а закриті порожнини обробляють «Мовілем». Як стверджують фахівці цих АТП, такий ВР та антикорозійна

обробка забезпечить кузову тривалий термін експлуатації. Однак при таких ремонтах ніхто не враховує накопичення осередків втомного руйнування та можливості подальшого корозійного розтріскування каркасу кузова.

Після такого ВР каркас кузова автобуса має досить пристойний зовнішній вигляд (рис. 4.32).



Рисунок 4.32 – Вигляд каркасу кузова автобуса «Богдан» А092 після ВР

Вартість повного ВР складає близько 200 тис. грн. У порівнянні із вартістю нового автобуса (2,5 млн грн), на перший погляд, це дуже вигідно. Однак такий ремонт не передбачає заміну тих елементів кузова, які мають суттєве накопичення втомної міцності при задовільному зовнішньому вигляді. У результаті таких ВР ресурс автобуса можна продовжити максимум на чотири роки. Те що фізико-механічні властивості елементів каркасу кузова автобуса, який був у експлуатації, вже не будуть мати належну міцність, підтверджують випробування зразків на розривній машині (розділ 4.1.2). Також це підтверджує огляд зразків, що вирізані з каркасу кузова під мікроскопом (розділ 4.1.3). Тому існуюча практика проведення ВР, що набула широкого застосування в АТП та багатьох ремонтних організаціях, не забезпечить належний ресурс кузова.

Також після таких ремонтів автобуси не будуть відповідати вимогам щодо ПБ згідно Правилам № 66 ЄЕК ООН, що підтверджує ІМ, проведене в розділі 3. Отже, виникла необхідність у впровадженні ремонтної практики, що дозволить проводити ВР належним чином із дотриманням заводських технологій.

4.3.2 Відновлювальні ремонти кузовів автобусів на рівні не нижче заводських технологій виготовлення

Враховуючи терміни експлуатації автобусів громадського транспорту, які лежать у межах від 5 до 8 років, постає питання у проведенні ВР. При чому після проведеного ВР автобус повинен відповідати наступним вимогам.

1. Після проведеного ВР міцність кузова повинна відповідати вимогам щодо ПБ згідно Правил № 66 ЄЕК ООН.

2. Довговічність відремонтованого кузова автобуса повинна бути неменшою, ніж довговічність кузова нового автобуса.

3. При виконанні повноцінного ВР автобуса присвоїти новий рік випуску автобуса, що відповідає року виконання ремонту.

4. Вартість ВР повинна бути мінімальною.

Для виконання вказаних вимог потрібно дотримуватись нижче запропонованих рекомендацій, що розроблені на основі досвіду експлуатації та ремонтної практики автобусів.

1. Для забезпечення відповідності міцності кузова несівної конструкції відповідно до Правил № 66 ЄЕК ООН при ВР потрібно замінювати всі без винятку елементи каркасу кузова, що знаходяться нижче підвіконного бруса. Вирізати одну стійку вище підвіконного бруса та перевірити фізико-механічні властивості матеріалу з якого вона виготовлена згідно запропонованої методики у розділі 4.1. Якщо фізико-механічні властивості матеріалу стійки відповідають властивостям нового матеріалу згідно табл. 4.1, то замінюється тільки вирізана стійка, а всі інші стійки, що знаходяться вище підвіконного бруса, не замінюються. При погіршенні фізико-механічних властивостей матеріалу стійки, що випробовувалася, змінюються всі стійки, що знаходяться

вище підвіконного бруса. У разі невизначеності та спірних питань, щодо доцільності заміни стійок потрібно провести ІМ на відповідність кузова згідно вимог Правил № 66 ЄЕК ООН (згідно методики підрозділу 3.3.1) вносячи в модель фізико-механічні властивості матеріалу стійки даного автобуса. За результатами ІМ замінити стійки каркасу кузова, деформації яких перевищують допустимі межі. При явних візуальних дефектах стійок (рис. 4.33) вони замінюються без випробувань.



Рисунок 4.33 – Пошкоджена стійка, що підлягає обов’язковій заміні

Такі пошкодження стійок (рис. 4.33) відбуваються при потраплянні вологи в середину стійок при відсутності або засмічуванні дренажних отворів.

Для забезпечення правильної геометрії каркасу кузова під час ВР потрібно використовувати спеціальне технологічне оснащення, яке використовується на підприємствах по виробництву автобусів. Зокрема до таких підприємств відносяться ВАТ «Укравтобуспром» (м. Львів), АТ «Черкаський автобус» (м. Черкаси) та інші. Також правильна геометрія

кузова автобуса може бути забезпечена і на інших підприємствах при застосуванні заводських технологій та заводського оснащення. На рис. 4.34. зображено каркас кузова при зварюванні в спеціальному оснащенні – стапелі.



Рисунок 4.34 – Каркас кузова автобуса несівної конструкції під час зварювання в стапелі

В процесі експлуатації автобусів можуть виникати тріщини вітрового скла, однією із причин яких є порушення геометрії пройми вітрового скла. Тому важливою операцією під час ВР буде контроль пройми вітрового скла за допомогою спеціального жорсткого шаблону (рис 4.35).



Рисунок 4.35 – Контроль пройми вітрового скла за допомогою спеціального шаблону

Такий шаблон використовується під час контролю пройми вітрового скла на заводах-виробниках автобусів.

При заміні труб каркасу потрібно використовувати їх із матеріалу, що відповідають конструкторській документації на автобус. Зокрема каркас кузова автобусів «Богдан», «Атаман» виготовляється зі Сталі 10 та Сталі 20. Зі Сталі 20 виготовляється каркас основи (рис. 2.13), а всі інші елементи каркасу (рис. 2.12) – зі Сталі 10. Допускається використання сталей іноземного виробництва з аналогічними або покращеними характеристиками. Наприклад: замість Сталі 20 використати Сталь S355J2G3. Зварювання каркасу кузова проводити згідно заводської технології за допомогою зварювальних вуглекислотних напівавтоматів з подачею дроту. Дріт рекомендується використовувати із зовнішнім покриттям міді. Після зварювання зачищаються заусенці так, щоб не послабити зварні шви.

2. Для того щоб довговічність відремонтованого кузова автобуса була не гіршою, ніж довговічність кузова нового автобуса, потрібно застосовувати

ремонтні технології на рівні заводу-виробника. Крім того на момент ремонту автобуса засоби АЗ та матеріали, з яких виготовляється кузов, можуть мати кращі захисні властивості, ніж на момент виготовлення автобуса. Тому під час ВР доцільно використовувати найновіші матеріали кузова та засоби АЗ.

Каркас кузова після зварювання і підготовки (свердління технологічних отворів, очищення від іржі, бруду, заусенців тощо) знежирюється (наприклад уайт-спіритом) та покривається методом розпилювання епоксидним високоадгезійним, антикорозійним ґрунтом. У місцях, де буде приварюватись облицювання, перед нанесенням епоксидного ґрунту по периметру приварюваних листів наклеюється малярний скотч. Потім після висихання епоксидного ґрунту знімається скотч та непокрите ґрунтом місце покривається високотемпературним струмопровідним ґрунтом. Таким чином каркас кузова не буде піддаватись корозії під обшивкою, як це було раніше (рис. 2.20). Потім приварюється облицювання кузова. Для облицювання бічних панелей потрібно використовувати сталеві листи згідно заводських креслень, при чому із обов'язковим двостороннім цинкуванням. Облицювання даху, як правило, під час ВР не замінюють. Оскільки облицювання даху мінімально підлягає корозії, то на виробництві його використовують без цинкового покриття, тому і під час ремонту недоцільним буде застосування цинкованого облицювання даху. Після приварювання облицювання приклеюються передня та задня маски (за наявності) з використанням спеціальних клеїв (наприклад Sicaflex). Потім кузов повністю ґрунтується, покриваються елементи каркасу та облицювання, що повернуті до дорожнього полотна, спеціальною мастикою (наприклад марки Dinitrol).

Враховуючи попередній досвід експлуатації автобусів, що вказує на інтенсивну корозію закритих порожнин каркасу кузова, особливу увагу слід приділити обробці закритих порожнин. Закриті порожнини обробляються через технологічні отвори, які свердляться в елементах каркасу основи, порогах та у інших складових кузова, щоб забезпечити обробку всіх закритих порожнин нижче підвіконного бруса. Закриті порожнини під час ремонту потрібно

обробляти так званими консервантами порогів типу «Мовіль», «Резистин» або марки Dinitrol, що забезпечують ефективний захист протягом тривалого терміну експлуатації. Вищеназвані засоби обробки можуть наноситись навіть на іржаві та вологі поверхні, оскільки мають високу проникливість та здатність ефективно витіснити вологу. Інші засоби, які дешевші та готуються із різних складових, можуть не забезпечити вищеназвані властивості та при висиханні можуть спричинити відшаровування покриття та провокування розвитку корозії.

Потім кузов готується під фарбування: шпаклюється (за необхідності), шліфується, наноситься чистовий ґрунт. Після підготовки кузов покривається двома шарами фарби (наприклад виробника Helios), а також можливе додаткове покриття лаком для підвищення довговічності лакофарбового покриття. При чому під лаком фарба менше вигорає і відповідно не втрачає насиченість кольору і блиск. Після нанесення лакофарбового покриття кузов сушиться. Додавання затверджувача у необхідних пропорціях дозволяє висихати лакофарбовому покриттю при температурі від 20 °С. У заводських умовах, для забезпечення стабільності кольору та часу висихання, кузов автобуса сушиться в камері при температурі 60 °С. Під час лакофарбових робіт потрібно прийняти всі міри, щоб попередити потрапляння бруду і пилу при нанесенні лакофарбового покриття і до повного висихання. Також необхідно забезпечити чистоту стисненого повітря, що використовується в фарбопультах при розпиленні лакофарбового покриття.

Після повного висихання кузов збирається відповідно до заводської технології. При чому для підвищення надійності системи електрозабезпечення автобуса рекомендується заміна основних джгутів проводки на нові з дотриманням заводських технологій монтажу.

3. Присвоїти новий рік випуску автобуса, що відповідає року виконання ремонту, можна при вищеописаному методі відновлення кузова несівної конструкції та встановленні силового агрегату поточного року випуску (для 2023 року з екологічними нормами не нижче Євро-5). Для автобуса на рамному

шасі потрібно раму перевірити на наявність дефектів, очистити засобами піскоструминної обробки та відновити покриття. При будь-яких дефектах рами зварювання не допускається та вона замінюється на нову. І відповідно заміна рами суттєво збільшує вартість ВР.

4. Для забезпечення мінімальних витрат під час ВР потрібно проводити якісну дефектацію кузова, що дозволить використовувати мінімальну заміну елементів каркасу кузова з одного боку. З іншого боку слід проводити дефектацію таким чином, щоб після ВР міцність кузова забезпечувала йому відповідність Правилам № 66 ЄЕК ООН. Також потрібно в ремонтну практику впроваджувати спеціальне оснащення, що дозволяє раціонально і якісно проводити ВР.

4.4 Висновки до розділу 4

1. В результаті визначення зміни характеристик міцності труб каркасу у процесі експлуатації експериментально доведено, що під час відновлювального ремонту автобуса «Богдан» А092 при пробігу 850 тис. км у чотирьох із шести зразках, які не мають зовнішніх пошкоджень взагалі не відслідковується межа текучості, межа витривалості зменшилась в 1,14–3,33 рази. Оскільки такі елементи не мають зовнішніх корозійних та механічних (тріщини) пошкоджень, то вони і не замінюються під час відновлювальних ремонтів. Тому проведені дослідження дозволяють стверджувати, що для якісного ремонту потрібно замінювати всі елементи каркасу кузова нижче підвіконного бруса.

2. Дослідження з використанням металографічного мікроскопу дозволяють побачити деградацію структури матеріалу каркасу кузова, який зовні не має пошкоджень, та вказують на те, що в процесі експлуатації автобуса неминуче відбудеться накопичення осередків втомного руйнування, що непомітні при класичних методах дефектації неозброєним оком.

3. Щоб прийняти раціональне рішення щодо заміни віконних стійок кузова автобуса, потрібно вирізати одну стійку та визначити властивості її матеріалу з використанням розривної машини. Потім перевірити на

відповідність кузова Правилам № 66 ЄЕК ООН з використанням імітаційного моделювання. Вирізна стійка замінюється, а інші – залежно від результату імітаційного моделювання.

4. Розроблений автономний прилад для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору має порівняно низьку собівартість виготовлення та достатню завадостійкість, що і забезпечує належну точність вимірювання (відхилення до 5%) без потреби у використанні зовнішніх джерел живлення. Калібрування з подальшим визначенням точності та працездатності розробленого приладу перевірена з використанням механічного тензometру Гугенбергера на пружній балці та на нових трубах каркасу автобуса, які взяті з програми виробництва.

5. Дорожні випробування з використанням приладу для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору та діагностичного комплексу IDSS підтвердили адекватність імітаційного моделювання при визначенні деформацій каркасу кузова в досліджуваному перерізі.

6. Під час дорожніх випробувань автобуса «Атаман» А092Н6 з використанням приладу для вимірювання деформації елементів каркасу кузова автобуса за допомогою зміни деформаційного опору було встановлено, що на деформацію каркасу кузова впливає стиль руху на автобусі при виконанні таких маневрів як «змійка» та «екстремне гальмування», що також в незначній мірі може бути причиною накопичення осередків втомного руйнування.

7. При розробці методичних засад відновлювальних ремонтів кузовів автобусів доведено, що класичні методи проведення відновлювальних ремонтів власними силами автотранспортного підприємства, або аналогічних ремонтних організацій не дозволяють забезпечити належну довговічність та відповідність кузова автобуса вимогам щодо ПБ згідно Правил № 66 ЄЕК ООН по причині відсутності методів контролю елементів, що не мають візуальних пошкоджень. Тому для підвищення ефективності відновлювальних ремонтів пропонується їх

проводити в заводських умовах за результатами належним чином проведеної дефектації.

8. При відновлювальних ремонтах доцільно застосовувати новітні технології та сучасні, в тому числі й полімерні матеріали, що дозволяють підвищити довговічність кузова автобуса після ремонту у порівнянні із заводським варіантом. Таким чином виникає необхідність у розробці методичних основ забезпечення необхідної довговічності автобусних кузовів на етапі проектування з послідуєчим впровадженням у ремонтну практику.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ КУЗОВІВ АВТОБУСІВ

5.1 Рівноміцність і довговічність кузова при проектуванні

Автобусобудування направлене на зменшення собівартості виготовлення кузова автобуса на всіх етапах, що підтверджується викладками в роботі [57]. Зменшення собівартості досягається забезпеченням конкретних властивостей кузова при постановці конкретно сформованого технічного завдання. При чому зменшення собівартості виготовлення ніяким чином не повинно впливати на погіршення рівноміцності кузова, а також на його довговічність. На основі алгоритмів та їх реалізації щодо забезпечення міцності та ПБ автобусних кузовів [48] можна забезпечити рівноміцність і довговічність кузова при проектуванні з використанням сучасних прикладних програм. При цьому для реалізації поставлених задач відносно рівноміцності та, як наслідок, довговічності кузова автобуса необхідно коректно сформулювати крайові задачі.

Таким чином створюється трьохвимірною модель кузова автобуса за допомогою засобів автоматизованого проектування [114–117], в яку вносяться наступні параметри:

- матеріали, з якого виготовляється кузов автобуса (Сталь 10, Сталь 20, Сталь 20, Сталь S355J2G3 тощо);
- жорсткість профілів у місці з'єднання та зварювання;
- з'єднання профілів із обшивкою відповідної товщини точковим зварюванням;
- вид сортаменту профілю, що вноситься до моделі.

Для максимальної відповідності моделювання кузова реальним умовам стосовно рівноміцності, що має прямий вплив на довговічність, у розрахункову модель підвіски вносяться гнучкі стрижні, жорсткість яких еквівалентна жорсткості підвіски реального автобуса, що відповідають їхнім заводським характеристикам. При побудові пружної ланки підресореної системи також

необхідно вказати значення поперечних жорсткостей відносно осей X , Y і жорсткості на кручення навколо осей X , Y , Z . Щоб уникнути надмірних ступенів свободи, рекомендується вводити значення жорсткості, які є максимально допустимими при реалізації в обраному програмному середовищі.

Перед тим як вносити параметри підвісок до моделі, необхідно враховувати їх особливості роботи. Оскільки підвіски бувають повністю ресорні (автобус «Еталон»), передні ресорні із задніми ресорними у поєднанні з пневморесорами (автобуси «Богдан», «Атаман») або передні і задні підвіски на пневморесорах.

Таким чином обираються основні режими, що і будуть формувати крайові умови [48]:

- при згині та крученні кузова найбільше динамічне навантаження на всі колеса автобуса;
- маневр у правий або лівий бік;
- екстрене гальмування;
- потрапляння кожним колесом у вибоїну;
- впирання в бордюр;
- максимальне динамічне навантаження на колеса по діагоналі;
- момент поштовху під час рушання;
- власні частоти коливання.

При згині та крученні кузова найбільше динамічне навантаження на всі колеса автобуса. При аналізі статичної міцності потрібно, щоб сумарні напруження у досліджуваному елементі кузова автобуса не перевищували допустимі значення міцнісних характеристик металу. Тому вводиться коефіцієнт запасу міцності n , який також має прямий вплив на підвищення довговічності кузова та нормального сприйняття кузовом системних перевантажень при перевезенні пасажирів у години пік. Зазвичай коефіцієнт запасу міцності n вибирається рівним 1,7. При екстремальних умовах, коли автобус створюється на рамному повнопривідному шасі, коефіцієнт запасу міцності повинен бути в межах від 4,0 до 4,5.

Також для відповідності комп'ютерного розрахунку натурним випробуванням уводиться коефіцієнт динамічності K_d , який буде залежати від типу самого автобуса та умов його експлуатації. Коефіцієнт динамічності K_d визначається або розрахунковими методами [48], або на основі натурального експерименту. Методика визначення коефіцієнту K_d для автобусів на рамному шасі набагато простіша, ніж для автобусів несівної конструкції, що додатково потребує застосування теорій кореляції.

Перевірка щодо згинальних та скручувальних навантажень проводяться на основі розкладання результуючої дисперсії на окремі складові, що формуються окремими входами. Складова результуючої дисперсії, яка сформована згинальними зусиллями дорівнюватиме сумі складових, які утворюються під дією збурень від передньої та задньої підвіски, що можуть передаватись від мікропрофілю дороги через шини.

При несиметричних збуреннях від мікропрофілю дороги між передньою і задньою підвіскою для визначення реальних кутів закручування несівної системи автобуса доцільно проводити натурний експеримент із використанням портативної тензометричної станції (підрозділ 4.2.1.1). В результаті натурних експериментів можна визначити лінійну залежність напружень в елементах каркасу кузова від кута його закручування, що дозволяє виконати розрахунок дисперсії напружень від несиметричних збурень. З використанням сучасних прикладних програм [73] стало можливим набагато швидше здійснювати пошук оптимальних значень рівнянь на основі багатofакторних математичних моделей та реалізовувати раціональні конструкторські рішення стосовно рівномірності каркасу кузова та його довговічності.

Якщо при формуванні крайових умов важливим моментом буде максимальне скорочення матеріалоемності каркасу кузова, то можливим буде варіант без додаткового застосування коефіцієнту запасу міцності n . У цьому випадку коефіцієнт динамічності K_d з достатньо високою точністю можна підібрати за допомогою програмних пакетів Adams, LS Dyna або їх аналогів. При застосуванні таких програми буде максимально точно врахована поведінка

каркасу кузова під час завантаження пасажирями, передачі поштовхів від мікропрофілю дороги через шини та підвіски з урахуванням їх особливостей роботи. В результаті чого може бути отримана сітка дискретних значень коефіцієнта динамічності K_d залежно від кількості пасажирів та швидкості руху. Враховуючи те, що значення згинальних напружень, що спричинені динамічними навантаження на ЕП автобуса ще невідомі, то вибирається максимальне значення коефіцієнту K_d . У такому випадку сумарний коефіцієнт динамічності C_d вибирається рівним 2,5. Тобто при коефіцієнті $C_d = 2,5$ КК автобуса буде працювати у межах текучості матеріалу при перевантаженні пасажирями у 2,5 разів. Однак у процесі таких постійних перевантажень поступово накопичуватимуться осередки втомного руйнування, що призведе до погіршення міцнісних властивостей каркасу кузова. Відповідно в процесі експлуатації спостерігатиметься поступове наближення матеріалу до утворення тріщин, і тому руйнування елементів каркасу може відбуватись вже без перевантажень.

Рама або каркас основи в сучасних автобусах може закручуватися до 15%, що є неприйнятним для автобусів із кузовами несівної конструкції до каркасу основи яких приварюються інші елементи каркасу кузова. При чому у місцях приварювання каркасу основи можуть також виникати осередки втомного руйнування, що в процесі експлуатації може негативно вплинути на довговічність. Особливості поведінки зварних єднань та їх тріщиностійкість детально досліджена в роботах [118–122]. Автобуси на рамному шасі характеризуються певною специфікацією сприйняття навантажень, оскільки рама має просту конструкцію із двох прямих поздовжніх лонжеронів, що з'єднані між собою поперечинами. Відповідно в автобусах на рамному шасі є можливість використання пружного з'єднання рами та кузова, що дозволить поглинати напруження від підвісок автобуса. При правильному підборі жорсткості опор це позитивно вплине на довговічність кузова по причині зменшення місць концентрації напружень та часткового поглинання вібрацій. Як правило, такі пружні проставки (опори) індивідуально вибираються для

кожної моделі автобуса. При встановленні гумових проставок між рамою та кузовом слід звернути увагу на те, що під дією незначного переміщення кузова відносно рами можуть утворюватись місця протирання антикорозійного покриття. Тому такі місця можуть стати осередками утворення інтенсивних корозійних пошкоджень, оскільки у поєднанні з кліматичною чи соляною корозією відкриті сталеві поверхні починають безпосередньо контактувати з гумою, яка містить сірку, що є каталізатором корозії.

Для автобусів типу Kombi сумарний коефіцієнт динамічності C_D приймається в межах 2,0–2,5, що менше на 0,5 у порівнянні з автобусами Low-entry. Це можна пояснити використанням пружних з'єднань між каркасом кузова та рамою за рахунок часткового поглинання енергії пружними елементами [123].

Відповідно під час розрахунку кузова рівномірність та визначення його довговічності, враховуючи дію мікропрофілю дороги на кузов автобуса та розв'язанні рівнянь рівноваги за допомогою Matlab Simulink слід також у рівняння (3.11) та (3.35) ввести коефіцієнт, що враховує сумарну жорсткість проставок (за наявності) між рамою та кузовом c_{III} .

Після визначення коефіцієнта динамічності K_D прикладаються в'язі до маточин коліс залежно від режиму розрахунку та навантажень у конкретних місцях моделі каркасу кузова.

При статичному розрахунку кузова автобуса за допомогою МКЕ потрібно навести маси всіх складових (вузлів, систем, агрегатів) у вигляді зосереджених навантажень до конкретних вузлів розрахункової схеми. При чому фактичні значення масово-центрових характеристик повинні відповідати технічним умовам автобуса та окремим його складовим. Для спрощення допускається розрахунок рівномірного розподілення корисного навантаження q по довжині ефективної довжини внутрішнього габариту салону l_C [48], що враховує такі складові: масу пасажирів, що сидять та стоять (норма площі на одного пасажирів, що стоїть – 0,125 м²), масу багажу (якщо передбачений), масу пасажирських сидінь.

Згідно Правил № 107 ЄЕК ООН [124], споряджений автобус навантажується наступним чином:

- маса водія – 75 кг;
- маса членів екіпажу для міських та приміських автобусів (при передбачені таких місць) – 75 кг;
- маса одного пасажера, що сидить або стоїть – 68 кг;
- маса одного місця під інвалідну коляску та користувача – 250 кг.

Режим згину. Алгоритм випробувань на статичну міцність під час згину містить такі етапи навантаження баластом:

- підресорена маса автобуса;
- маса решти складових (вузлів та агрегатів);
- маса корисного навантаження на даному етапі розрахунку.

При статичному розрахунку кузова автобуса за допомогою МКЕ потрібно прикласти маси всіх складових (вузлів, систем, агрегатів) у вигляді зосереджених навантажень до конкретних вузлів розрахункової схеми, що відповідають дійсним точкам їх кріплення. Крайові умови для аналізу міцності каркасу кузова при згині формуються на основі розподілу елементів автобуса з таких трьох складових [48]:

- вузли, агрегати та системи шасі;
- вузли, агрегати та системи кузова;
- корисне навантаження.

Сума всіх складових мас автобуса повинна бути рівною спорядженій масі. При чому значення прикладених до просторової моделі каркасу кузова навантажень потрібно збільшити на коефіцієнт динамічності ($K_d = 2,0$ – для типу Kombi; $K_d = 2,5$ – для інших типів кузовів). Також під час розрахунку вносяться значення і невідресорених мас.

В'язі прикладаються до маточин всіх коліс автобуса так, щоб сприймалось вертикальне навантаження з обмеженням переміщення як єдиного цілого кузова відносно інших осей:

- ліве переднє та заднє колеса обмежені по вертикалі Z від переміщень, введенням ланки потрібної жорсткості;
- праве переднє колесо обмежується від переміщень по всіх трьох осях X, Y, Z ;
- праве заднє колесо обмежується по осях Y, Z , (вертикальна ланка повинна відповідати заданій жорсткості).

Під час оцінки жорсткості кузова на згин одним із базових критеріїв є відношення рівнодіючої усіх зосереджених сил, діючих на каркас автобуса у міжколійній базі, до максимального вертикального прогину. Рівнодіюча зосереджених сил отримується при зведенні діючих сил від усіх агрегатів, що розміщені в базі каркасу кузова, враховуючи сумарний коефіцієнт динамічності $C_d = 2,5$. Необхідно враховувати те, що зміною коефіцієнту динамічності можна впливати і на довговічність каркасу кузова.

Модель, що використовується для розрахунку: фіксується в'язями з обмеженнями від переміщень вздовж та провертання навколо осей X, Y, Z . Наприклад для автобусів з усіма пневматичними підвісками: спереду два пневмобалони (фіксація виконується у шести вузлах кріплення фланців кожного пневмобалону), ззаду чотири пневмобалони (фіксація виконується у чотирьох вузлах кріплення фланців кожного пневмобалону). Слід також враховувати, що біля кожної площадки кріплення пневмобалонів можуть утворюватись втомні тріщини в процесі експлуатації під дією корозії та передачі поштовхів від мікропрофілю дороги через шини та підвіску.

Режим кручення. Кручення відноситься до другого виду розрахунку і визначається або при повній зупинці автобуса, або під час руху з мінімальною швидкістю по дорозі низької якості (із бордюрами, вибоїнами, впадинами і горбами тощо), що супроводжується відриванням одного із коліс від дорожнього покриття. Імітація руху по дорозі низької якості більш підходить при розрахунку довговічності кузова автобуса з урахуванням режимів кручення, хоча сумарний коефіцієнт динамічності C_d буде рівним одиниці. У такому випадку основне навантаження розподіляється між трьома колесами, що

залишилися в контактi з дорогою. Таким чином формується трикутник у межах якого знаходиться зведений центр мас автобуса.

Для автобусів типу Low-entry для збереження статичної рівноваги вивіщується одне з коліс передньої осі, оскільки при зосередженні маси на задній осі такого автобуса в реальних умовах експлуатації не відриваються від дороги задні колеса. В монографії [48] детально описаний розрахунок кузова на кручення, де порівнюються розрахункові значення з максимально допустимими.

Як і під час згину, в'язі прикладаються до маточин коліс згідно умов.

1. Вивіщування лівого переднього колеса:

- переміщення лівого переднього колеса без обмежень;
- переміщення переднього правого колеса обмежене по усіх трьох осях X , Y , Z ;
- переміщення заднього правого колеса обмежується по осях Y , Z , (вертикальна ланка відповідає заданій жорсткості).

2. Вивіщування лівого заднього колеса:

- переміщення лівого заднього колеса без обмежень;
- переміщення переднього правого колеса обмежене по усіх трьох осях X , Y , Z ;
- переміщення заднього правого колеса обмежується по осям Y , Z , (вертикальна ланка відповідає заданій жорсткості);
- переміщення переднього лівого колеса обмежується по осі Z (по вертикалі) введенням ланки заданої жорсткості.

3. Діагональне вивіщування при опорі на два колеса:

- переміщення переднього лівого колеса обмежується по осях Y , Z введенням вертикальної ланки заданої жорсткості;
- переміщення переднього правого та заднього лівого коліс без обмежень;
- переміщення заднього правого колеса обмежене по усіх трьох осях X , Y , Z .

Діагональне вивішування є частковим випадком вивішування одного з коліс, до моменту коли перекидальний момент та хід однієї з пневмопідвісок спричинить жорсткий контакт третього колеса з поверхнею дороги.

Частина навантажень від власної ваги вузлів та агрегатів поглинається пружними елементами підвіски. Однак у процесі експлуатації підвіски зношуються, що може призводити до більш частих їх пробоїв та суттєво вплинути на довговічність каркасу кузова. Тому для проведення розрахунку, що враховує втрату заданих показників підвіски раціональним варіантом, при забезпеченні необхідного запасу міцності, буде прикладення в'язей не до маточин коліс, а безпосередньо до фланців пневмобалонів підвіски з відповідними зварними фермами кузова автобуса.

Кріплення фланців пневмобалонів до площадки кузова жорсткі (в основному болтові з'єднання) тому і в розрахунковій моделі прикладаються в'язі з обмеженнями переміщень та обертань відносно осей X , Y , Z .

Остаточна оцінка жорсткості кузова автобуса при почерговому вивішуванні передніх коліс проводиться в результаті аналізу крутильної жорсткості кузова C_T , яка дорівнює відношенню моменту згину від рівнодійної усіх зосереджених в активній області сил M_T до максимального кута закручування α . Момент M_T визначається згідно методики, описаної в монографії [48] на основі визначення рівнодійної сили F_p , що складається з сили тяжіння всіх вузлів, агрегатів та пасажирів помноженої на віддаль l від точки опори до вузла, який має максимальний прогин. У першому наближенні (без урахування асиметричності завантаження переднього звису) рівнодійна сила F_p визначається, як половина ваги, що діє на передню вісь згідно технічного завдання.

Вибіона спереду зліва / спереду справа / вибіона ззаду зліва / вибіона ззаду справа. Такі випадки будуть відповідати діагональному вивішуванню кузова без втрати контакту коліс із дорогою, при якому визначається крутий момент, визначення якого важливе під час розрахунку кузова на міцність та,

задавши конкретний цикл, стає можливим провести розрахунок і на довговічність.

Автобуси мають або несівний кузов, або кузов на рамному шасі. Несівний кузов сприймає все навантаження, а в автобусі на рамному шасі крутний момент розподіляється між кузовом та рамою. Жорсткість рами під час кручення мала (1500–4000 кгс·м/рад) у порівнянні з жорсткістю кузова автобуса закритого типу фургон (10^6 кгс·м/рад) [48], тому при такому розрахунку жорсткістю рами нехтують. У звичайних автобусних кузовах (наприклад типу «Комбі») жорсткість кузова в кілька разів менша. Тому в такому випадку при забудові кузова на рамному шасі доцільно проводити і оцінку на кручення рами.

Розрахунок крутного моменту. Спочатку визначаються реакції від підресореної маси автобуса, що діють на передні та задні колеса.

Максимальний крутний момент M_{\max} , що діє на несівну систему, визначається при вивішуванні одного із передніх коліс. Розрахований крутний момент M_{\max} досягає максимального значення при вільному вертикальному переміщенні одного колеса на висоту Δh таким чином, що реакція на колесі дорівнюватиме нулю (колесо може торкатися поверхні, але не створює ніяких реакцій). Висота Δh в реальній практиці складається з прогину ресори (пневмобалону) x , стискання шини y та закручування кузова довжиною l на кут φ (жорсткість кузова). При динамічному навантаженні виникає діючий розрахунковий момент $M_{\max rez}$, який отримується в результаті добутку максимального крутного моменту M_{\max} та коефіцієнту динамічності k ($k = 1,5–2,0$). Також для формування крайових умов потрібно враховувати глибину вибоїни h . При русі автобуса по рівному асфальтобетонному покритті h приймається в межах від 0,15 до 0,2 м. Величини відхилені від мікропрофілю дорожнього покриття можна отримати з їх кореляційних функцій (на основі реальних експериментів), що також використовуються під час визначення довговічності кузова автобуса.

Максимальне динамічне асиметричне навантаження на колеса: переднє ліве / заднє праве / переднє праве / заднє ліве. Такий розрахунок найскладніший з точки зору напруженого стану каркасу кузова та схожий на попередній випадок (вибоїна спереду зліва / спереду справа / вибоїна ззаду зліва / вибоїна ззаду справа). Однак попередній випадок реалізований при діагональному вивішуванні автобуса під час статичного розрахунку без врахування динаміки руху (коефіцієнт динамічності $K_d = 1$).

Для даного варіанту при дослідженні кузова на крутильну жорсткість визначається переміщення Δh при одночасному наїзді на нерівність колесами по діагоналі (наприклад переднє ліве та заднє праве). Потім за допомогою МКЕ з використанням сучасного програмного забезпечення визначається жорсткість кузова автобуса за відомим алгоритмом [48].

Слід відзначити, що важливим є розрахунок кроку точкового зварювання обшивки кузова. Як правило, цей крок лежить у межах від 30 до 64 мм, при чому мінімальний крок дорівнює трьом діаметрам точкового шва. Крім приварювання листів обшивки слід також враховувати можливість їх приклеювання (листи із двостороннім цинкуванням із профільованою кромкою, або полімерні листи типу Алюкобонд). Застосування клеєвих технологій дозволяє зменшити сумарну протяжність зварних швів та позитивно вплинути на РКА. Крім цього приклеєні листи обшивки та вклеєні стекла забезпечують більш рівномірне розподілення навантажень при скручуванні кузова (замість точок-концентраторів напружень).

Впирання у бортовий камінь тротуару, гальмування. Під час динамічних випробування автобуса визначаються максимальні значення вертикального прискорення, які досягають $3g$.

Максимальне значення сповільнення складає $1g$ під час руху в повороті з поперечними силами в горизонтальній площині та повздовжніми гальмівними силами, що обмежені зчепленням шин із дорогою.

В такому випадку при визначенні відповідних максимальних навантажень потрібно множити прискорення або сповільнення на коефіцієнт 1,5. Тому

максимальне прискорення від удару об перешкоду становитиме $\pm 4,5g$, поздовжнє під час прискорення або гальмування становитиме $\pm 1,5g$, прискорення при повороті ліворуч/праворуч досягне $\pm 1,5-1,7g$. Якщо колеса автобуса розгальмовані, то напрям рівнодійної сили проходить лише через вісь обертання. Динамічна реакція більша в 4,5 рази за вертикальну статичну реакцію контакту колеса. Рівнодійна сила, яка проходить через вісь колеса та точку його контакту з перешкодою буде рівною $4,5R/\cos\theta$. Горизонтальна складова рівнодійної сили рівна добутку $4,5Rtg\theta$. При швидкому доланні перешкоди висотою H (відбувається незначне переміщення кузова ввєрх) ефективна висота перешкоди буде рівна $H-(D-S)$, де S – хід підвіски при статичному навантаженні від ваги автобуса; D – повний хід підвіски при наїзді на перешкоду. Висота перешкоди приймається в межах від 200 до 250 мм із урахуванням допустимої деформації шин. При русі по дорогах низької якості можуть відбуватись постійні пробої підвісок, що має важливе значення при розрахунку довговічності каркасу кузова автобуса.

При розрахунку розглядаються такі основні випадки навантажень, що виникають під час експлуатації автобуса:

- удар по перешкодї при гальмуванні;
- удар по перешкодї під час прискорення;
- удар в перешкоду при поворотї.

При таких розрахунках важливо отримати карту розподїлу деформацій та напружень кузова, при чому необхідно досліджувати локальну мїцність та проводити ресурсні випробування при знакозмїнних навантаженнях в областї кріплення підвісок. Втомні трїщини під час реальної експлуатації виникають у першу чергу поблизу кріплень підвісок, що є основними чинниками, якї обмежують ресурс кузова.

Поворот вправо / вліво. Навантаження, що виникають при поворотї автобуса, визначаються із урахуванням статичних реакцій від колїс передньої R_A та задньої осї R_B . Якщо автобус буде на межї перекидання, то його вага G дїятиме тїльки на зовнїшнї колеса.

Методика розрахунку, яка детально описана в монографії [48], передбачає наступне:

- прикладення в'язей до маточин коліс (аналогічно розрахунку на режим кручення) з додатковим ступенем свободи по повздовжній осі автобуса;
- прикладення реакцій від усіх складових автобуса: вузлів, агрегатів, корисного навантаження та решти мас автобуса до точок їх кріплення (встановлення). Вектори дії реакцій лежать на лініях відцентрових сил, що діють на зазначені маси з точки центру повороту.

При належному розкладанні на складові автобуса забезпечиться належна точність розрахунку.

В результаті аналізу за МКЕ отримується карта розподілу напружень вздовж складових одиниць каркасу кузова (лонжерони, шпангоути, поперечини тощо) на основі порівняння з межею міцності текучості та максимальних абсолютних напружень. Запас міцності відповідно до межі текучості повинен бути більше 70%, що може забезпечити належну довговічність при русі по дорогах низької якості.

При русі в повороті автобус може або ковзати або перекидатись, що далі і буде розглянуто із урахуванням навантаження на кузов.

Перекидання автобуса. Втрата стійкості автобуса під час повороту (при небезпеці перекидання) відбудеться при досягненні поперечної сили P_y^{\perp} , якщо сумарна нормальна реакція Z_B , що діє на внутрішні колеса, буде рівною нулю.

Поперечна сила P_y^{\parallel} , яка складається із поперечних реакцій від дороги Y_A та Y_B , спричиняє поперечне ковзання автобуса при її рівності сумарній силі зчеплення коліс з дорогою φG .

Стійкість автобуса можна збільшити розширенням колісної колії B та зниженням координати центру ваги h_g . В результаті чого колеса автобуса почнуть ковзати при менших значеннях поперечної сили P_y^{\parallel} за силу P_y^{\perp} , що спричиняє перекидання ($P_y^{\perp} > P_y^{\parallel}$).

На ЕП аналіз міцності при перекиданні автобуса проводиться згідно Правил № 66 ЄЕК ООН [3] з використанням ІМ автобуса та внесенням

характеристик нового матеріалу труб каркасу до розрахункової моделі [48]. Щоб здійснити аналіз на відповідність автобуса цим Правилам [3] у процесі експлуатації в розрахункову модель вносяться характеристики труб із урахуванням деградації їх матеріалу [54].

Занос автобуса. На колеса автобуса під час руху в площині дороги діють дві взаємоперпендикулярні складові: поперечна Y та повздовжня, яка складається з гальмівної P_T сили та сили тяги P_T . Ковзання колеса відбувається при досягненні рівнодійної цих сил силі зчеплення ϕZ .

Задня вісь автобуса більш схильна до заносу при гальмуванні, ніж передня в результаті того, під час гальмування розподіл нормальних реакцій у повздовжньому напрямку призводить до зменшення реакції задніх коліс Z_2 та збільшення реакції на передні колеса Z_1 . Такий перерозподіл сил компенсується сучасними засобами керування розподілу гальмівних сил, що попереджають блокування коліс під час гальмування (ABS, ESP). Також якщо колесо загальмувало до ковзання ($P_T = \phi Z$), то теоретично бічне ковзання може виникнути при самих мінімальних значеннях бічної сили. Неминуче сучасні системи розподілу гальмівних сил призводять до зменшення навантажень на кузов і при класичних методах розрахунку [48] довговічність кузова в таких умовах буде вищою.

Аналіз отриманої розрахункової моделі необхідно здійснювати з використанням МКЕ по напруженню, деформації та куту закручування кузова. Кут закручування слід розглядати посекційно з умов відносного взаємного кута закручування як показника, що впливає на рівномірність каркасу кузова.

Пусковий момент під час рушення. Під час руху автобусів, при перевезенні пасажирів у місті з часто повторюваними режимами старт-стоп (дискретний режим руху), важливо проводити аналіз пускового моменту, який безпосередньо діє на КК автобуса та є одним із чинників впливу на його довговічність.

Для таких розрахунків застосовується теорія обертання ведучого колеса (до якого прикладений крутний момент M_k і від нього на кузов/раму передається тягова сила P_k) по горизонтальній дорозі з твердим покриттям [48].

Алгоритм визначення крайових умов при імітації навантаження на кузов починається з аналізу встановлених на автобусі шин. Після визначення величини R_k прикладаються крайові умови до розрахункової моделі автобуса. При цьому сила R_k розкладається на складові, які прикладаються до каркасу кузова у точках кріплення ведучого моста (ведучих мостів) автобуса. Найважчий випадок рушання імітується при блокуванні передніх коліс: до маточин передніх коліс прикладаються в'язі r_y , що обмежують рух автобуса в повздожньому напрямку. Також слід проводити аналіз деформацій у місцях кріплення силового агрегату, при чому деформація лонжеронів поблизу місць кріплення не повинна перевищувати 3–5 мм. Такі циклічні навантаження теж можуть впливати на довговічність каркасу кузова. Однак основним джерелом накопичення осередків втомного руйнування будуть поштовхи від мікропрофілю дорожнього полотна у поєднанні із завантаженням пасажирями, швидкістю руху та корозійними процесами.

Розрахунок власних та вимушених коливань. Кузов під час руху автобуса піддається динамічним навантаженням, тому слід проводити розрахунок власних частот та відповідних їм формам. При розрахунку розглядаються вільні коливання кузова як система з розподіленими параметрами. З цією метою при застосуванні МКЕ використовують або ітерацію Арнольдї, або ітерацію підпростору. Для простих конструкцій (кількість ступенів свободи до 5000) слід використовувати метод Арнольдї, при більших значеннях застосовувати метод ітерації підпростору.

Розрахунок власних коливань здійснюється з урахуванням розподіленої матриці мас.

При розрахунку вимушених коливань слід врахувати те, що на КК впливають зовнішні чинники, котрі змінюються з часом згідно певного закону.

При розрахунку з використанням МКЕ вводяться такі крайові умови:

- графічна залежність зміни навантажень від часу;
- логарифмічний декремент коливань;
- кількість власних врахованих форм;
- інтервал розрахункового часу;
- кількість проведених розрахунків на конкретний момент часу.

Розрахунок каркасу кузова автобуса на вимушені коливання повинен мати такі результати:

- переміщення вузлів кузова;
- напруження, які виникають у стрижнях, пластинах, об'ємних елементах;
- реакції в опорах.
- власні форми та частоти коливань.

Прогин кузова автобуса. Дослідження ефективного моменту інерції боковини кузова автобуса дані в роботі [48], які передбачають випробування кузова на прогин у вигляді балки, що поставлена на двох опорах і навантажена одиничною зосередженою силою в середині прольоту, яка спричиняє прогин δ . Відповідно там [48] наведено розрахунок кузова на прогин. При чому величина прогину кузова впливає безпосередньо на його довговічність. Тобто при економії матеріалу та зменшенні ваги каркасу кузова прогин може бути близьким до допустимих меж. У такому випадку обов'язковим при розрахунку кузова буде його розрахунок на довговічність з використанням ІМ (наприклад у Matlab Simulink).

Кручення кузова автобуса. За простою методикою визначення жорсткості під час кручення кузова автобуса, його боковини будуть сприймати основне навантаження і вважається, що частина конструкції, яка нижча від горизонтального перерізу (під середнім повздовжнім брусом боковини), має нескінченну жорсткість у порівнянні із жорсткістю балочних елементів. Таку конструкцію можна розглянути як тонкостінну трубу із повздовжньою віссю симетрії. Згинальні моменти від зовнішнього поясу до підвіконного бруса викликає згинання стійок вікон. З використанням методу сил визначається кут

повороту однієї стійки, а потім знаходиться сума повороту всіх віконних стійок [48].

При забезпеченні рівномірності каркасу кузова на ЕП необхідно враховувати також те, щоб конструктивно закладені показники міцності кузова повинні бути максимально стабільними в процесі експлуатації. Оскільки вагомий вплив на РКА мають корозійні процеси, то виникає необхідність у розробці технологічних засад із використанням сучасних матеріалів кузова та засобів АЗ у процесі виробництва.

5.2 Технологічні засади забезпечення довговічності кузовів у процесі виробництва

Враховуючи сучасні тенденції автобусобудування, автобуси громадського транспорту потребують постійного вдосконалення конструкції при конкурентоспроможній адекватній вартості [125]. Автобуси повинні відповідати вимогам Правил ЄЕК ООН № 66 [3]. Ці Правила [3] передбачають відповідність автобусів ПБ на стадії проектування та виготовлення. Однак у процесі експлуатації кузов автобуса зношується під дією корозії та динамічних навантажень. З часом може наступити момент, коли кузов автобуса вже не буде відповідати вимогам щодо ПБ [3]. Визначити момент невідповідності в умовах експлуатації без використання спеціальних методів та розрахунків практично неможливо. Та й перевізники більш зацікавлені прибутком, а не додатковими витратами на перевірку ПБ автобусів. А експлуатуючі організації зацікавлені в підвищенні корозійної стійкості і довговічності автобусів. В свою чергу, надійний АЗ автобусів відтермінує момент настання критичного рівня невідповідності рівня ПБ. На сьогодні є великий вибір різних полімерних матеріалів, клеєвих сумішей та засобів АЗ, навіть тих, що не використовуються в автомобілебудуванні. Ці матеріали дозволяють позитивно вплинути на вдосконалення АЗ автобусів, оскільки полімерні матеріали, на відміну від сталевих елементів обшивки, взагалі не іржавіють. Застосування клеєвих технологій замість зварювання також дозволяє зменшити сумарну протяжність

зварних швів, які є також осередками розвитку корозії. Тому, в першу чергу, актуальним питанням завжди буде розвиток технологій виготовлення та поліпшення АЗ кузовів автобусів. Запропоновані матеріали обов'язково повинні експериментально перевірятись на відповідність адгезійним властивостям як на початку експлуатації, так і в процесі старіння. Вдосконалення технологій та застосування прогресивних матеріалів, з урахуванням реальної експлуатації, дозволить підвищити довговічність автобусів. У результаті чого буде довготривала відповідність автобусів вимогам щодо ПБ згідно Правил ЄЕК ООН № 66 [3]. Дослідження, що проводяться, повинні підтвердити адгезійні властивості запропонованих матеріалів. А саме ґрунтів, які наносяться на труби каркасу кузова із використанням засобів поліпшення адгезії (праймер, активатор) та матеріалів облицювання, що приклеюються (Алюкобонд, цинковані листи). Під час експлуатації запропоновані матеріали не повинні змінювати своїх адгезійних властивостей, тому дослідження проводяться із застосуванням технологій прискореного штучного старіння. При застосуванні облицювання кузова із полімерних матеріалів РКА може бути обмежена тільки корозійною стійкістю каркасу кузова та незмінними адгезійними властивостями клеючих сумішей. Тому для підвищення довговічності кузова, у поєднанні з облицюванням із полімерних матеріалів, важливим також буде захист каркасу як ззовні, так і закритих його порожнин. Із використанням облицювання з полімерних матеріалів та високоефективного захисту каркасу кузова ВР будуть суттєво відтерміновані або взагалі недоцільні. Після завершення життєвого циклу сталеві частини кузова підуть на переплавку, а полімерні елементи обшивки потребуватимуть переробки або утилізації. З точки зору екології це завдає деяких складностей, однак забезпечить стабільність належної пасивної безпеки автобуса. Альтернативним варіантом підвищення корозійної стійкості кузова автобуса може бути використання нераціональних та токсичних катафорезних ванн, що потребують періодичної утилізації та більш шкідливі, ніж полімерне облицювання.

В роботі [5] було доведено, що корозія автобусів призводить до їх тривалих простоїв. Від цього АТП несуть суттєві збитки. Це, в свою чергу, ускладнює нормальну роботу АТП та негативно впливає на якість перевезення пасажирів. Тому розвиток технологій кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності має важливе практичне значення. В роботі [126] представлено результати моделювання вібронвантаженості кузова автобуса, що дозволяють оцінити поведінку матеріалу кузова в експлуатації. Однак корозійні процеси не враховано. В роботі [90] детально описано, яким чином можна спрогнозувати РКА із урахуванням корозії. В продовження даної роботи [90] актуальним буде розвиток технологій виготовлення кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності. Важливим є те, що модель, яка представлена в [90], дозволяє спрогнозувати ресурс автобуса. Це дозволить визначити настання моменту невідповідності вимогам Правил ЄЕК ООН № 66 [3] при будь-якому підвищенні корозійної стійкості кузова. Для підвищення корозійної стійкості кузова автобуса можна запропонувати виготовляти кузов із нержавіючої сталі, або використовувати окремі елементи кузова, що максимально вражаються корозією. Варіант із використанням окремих елементів кузова із нержавіючої сталі більш раціональніший, однак це призведе до підвищення маси та вартості автобуса, що суперечить сучасним тенденціям автобусобудування [127]. В роботі [127] прагнуть ще зменшити масу кузова автобуса, що підтверджує доцільність застосування прогресивних легких полімерних матеріалів. До прогресивних технологій також слід віднести застосування приклеєних бічних панелей типу Алюкобонд (полімерні листи із двостороннім покриттям алюмінієвої плівки). В роботі [15] описане використання елементів обшивки кузова із гальванічним покриттям. Особливістю даного АЗ є те, що вирубка та формування елементів кузова проводиться за спеціальною технологією. Така технологія [15] мінімізує пошкодження гальванічного покриття та передбачає його захист у місцях вирубки. Однак, на відміну від [15], в роботі [128] досліджено інтенсивні процеси формування продуктів корозії на сталевих листах із цинковим покриттям в агресивних середовищах. Тому під час

використання сталевих листів з двостороннім цинкуванням потрібно їх покривати додатковим АЗ, що в комплексі підвищить корозійну стійкість. В роботі [129] описано застосування катафорезних покриттів, де розглянуто недоліки таких покриттів та методи підвищення корозійної стійкості. Катафорезні покриття безперечно мають високу ефективність захисту від корозії. Однак при виготовленні кузовів катафорезні ванни повинні бути великих об'ємів. Відповідно це потребує додаткового обладнання, побудову спеціального цеху. При порівняно малій партії випуску такий метод не окупиться. Крім того, така антикорозійна обробка періодично потребує постійного оновлення розчину та його утилізацію. Тому на відміну від катафорезу [129] для АЗ автобусів, слід застосовувати більш раціональні методи. В роботі [130] описані умови експлуатації автобусів громадського транспорту та запропоновані заходи по підвищенню довговічності кузовів автобусів під час експлуатації. В роботі [131] запропоновані технологічні засади забезпечення довговічності кузовів автобусів у процесі виробництва. Такі методи [130, 131] потребують подальшого розвитку та впровадження у виробництво і реальну практику експлуатуючих організацій, у зв'язку із більш раціональним АЗ кузовів автобусів. У роботі [132] описано шкідливий вплив атмосферної корозії на метали. Беручи до уваги дану інформацію [132], можна розвинути методи по підвищенню корозійної стійкості кузовів автобусів при використанні сучасних полімерних матеріалів та високоефективних засобів обробки. Патенти [133, 134] підтверджують актуальність використання облицювальних бічних панелей з пластику на легкових автомобілях. Такі панелі запропоновано застосовувати на спеціальних кліпсах кріплення [133] або приклеювання [134], що більш актуально для автобусів. Таким чином існує багато варіантів поліпшення корозійної стійкості кузовів автобусів. Однак існуючі технології потребують вдосконалення, враховуючи можливість використання нових полімерних матеріалів та раціональних методів обробки, в аспекті корозії і довговічності автобуса. Тому необхідно вдосконалити існуючі технології кузовів автобуса в аспекті корозії і довговічності. Це дасть

можливість поліпшити корозійну стійкість кузовів автобусів та підвищити їх довговічність під час експлуатації за рахунок вирішення наступних задач:

– запропонувати концептуальні рішення щодо напрямку вдосконалення технології кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності, використовуючи автомобільні матеріали та прогресивні матеріали іншої області застосування, враховуючи конкретне призначення автобуса;

– провести випробування клеєвих сумішей із поверхнями приклеювання щодо їх адгезійних властивостей, для подальшого впровадження у виробництво, з умови надійності та довговічності в процесі старіння.

Об'єктом дослідження будуть технології кузовів автобусів та формування рекомендацій для проектних кузовних робіт з умов регламентованої довговічності кузова, що впроваджується у виробництво.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що є багато сучасних полімерних матеріалів, які не використовуються у автомобілебудуванні. При застосуванні таких матеріалів у поєднанні із прогресивними технологіями може суттєво поліпшитися корозійна стійкість. Також нові матеріали підвищать довговічність кузовів автобусів, при умові перевірки адгезійних властивостей у процесі старіння.

Для розробки пропозицій та обґрунтування технологій кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності було використано пошукові методи, а саме: здійснено аналіз засобів антикорозійної обробки, існуючі автомобільні матеріали, а також інших областей застосування. Запропоновано методи приклеювання зовнішніх панелей облицювання кузова, у тому числі із неавтомобільних полімерних матеріалів та обґрунтовано раціональні варіанти застосування.

Для перевірки матеріалів щодо їх адгезійних властивостей для подальшого впровадження у виробництво було використано методи натурального експерименту на розривній машині Р-5 в лабораторних умовах згідно стандарту ISO 4587. Для максимального наближення лабораторних випробувань до реальних умов експлуатації – враховано ряд факторів: температура

навколишнього середовища, підвищена вологість та соляний туман. Перший етап: температура навколишнього середовища досліджуваних зразків була витримана згідно DIN 5014 протягом семи діб при значенні 23 °C та 50% вологості. Другий етап: зразки були нагріті до температури 80 °C протягом трьох діб. Третій етап: зразки витримувались у воді при температурі 70 °C протягом семи діб. На четвертому етапі зразки витримувались під дією соляного туману протягом семи діб згідно ISO 11997-1:201. Потім зразки, безпосередньо перед проведенням дослідження на розрив, були витримані при температурі 23 °C та 50% вологості протягом двох годин згідно DIN 5014.

Помилка репрезентативності визначається за формулою

$$\Delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (5.1)$$

де n – кількість вимірів;

σ – середнє квадратичне відхилення;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (5.2)$$

де X_i – i -ї варіанти;

\bar{X} – середнє арифметичне;

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}. \quad (5.3)$$

Тестові зразки складаються з двох смужок досліджуваних матеріалів, склеєних між собою, що перекривають один одного. На рис. 5.1 зображено форму і розміри тестових зразків, що використовувались під час досліджень.



Рисунок 5.1 – Форма і розміри тестових зразків, що використовувались під час досліджень

При підготовці зразків було враховано наступні вимоги:

- зразки були виготовлені із тих матеріалів, що і елементи кузова автобуса;
- зміщення ширини при склеюванні двох половин зразка не перевищував 0,5 мм;
- поздовжня вісь склеєного зразка не має кривизни в площині клейового шва;
- частини видавленого клею на кінцях клейового шва очищувались перед випробуванням;
- для випробування взято сім зразків при кожній технології склеювання;
- після склеювання зразки були витримані не менше, ніж 12 годин до проведення випробування;
- вирізані зразки з труб (перерізом 40×60×2,5 мм) каркасу кузова покриваються сірим ґрунтом Helios 2K E-ZP, згідно технології покриття

каркасу кузова автобуса;

– вирізані зразки сталевих листів з двостороннім цинкуванням та полімерні листи типу Алюкобонд (з двостороннім алюмінієвим покриттям) ґрунтом не покриваються.

Досліджено три варіанти нанесення на приклеюванні поверхні покриттів, що за технологією Sica повинні поліпшувати адгезію:

- Sica Aktivator – 100;
- Sica Aktivator – 100 + Primer 206 G + P;
- Sica Aktivator – 205.

Для проведення досліджень обрано чотири модифікації клеїв Sicaflex чорного кольору: Sicaflex – 221, Sicaflex – 252, Sicaflex – 263, Sicaflex – 265.

Оскільки міцність на зріз досліджуваних клеїв Sicaflex згідно CQP 046-1/ISO-4587 перевищує 5 МПа, то більші за 5 МПа навантаження повинні відповідати когезійному розриву (близько 160 кг розтягу на розривній машині).

5. 2.1 Концептуальні рішення по вдосконаленню технології кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності

Корозія – основний вид зносу сталевих елементів кузова. Тому характерними видами зносу і пошкоджень кузова в процесі експлуатації автобуса є корозія металу, що виникає на поверхні та в закритих порожнинах кузова під дією хімічних або електромеханічних дій.

На характер протікання корозії впливає склад сталі, з якої виготовляються деталі кузова. В процесі гарячого прокату або зварювання поверхня сталі окислюється і утворюється окалина і це може суттєво впливати на корозійну стійкість. Якби окалина мала добру адгезію до металу, була суцільною та непроникною, то вона була б надійним захисним покриттям. Однак на практиці окалина швидко розтріскується і відшаровується. При наявності вологи окалина на поверхні сталевого прокату може призвести до сильної піттингової корозії.

Тому сталеву поверхню доцільно очищати від окалини. При цьому вид очищення також впливає на протікання корозії.

За результатами п'ятирічних корозійних випробувань британськими вченими сталевих зразків на відкритому повітрі, залежно від способу обробки виявлено різний ступінь корозії. Середня глибина корозії сталевого прокату склала 0,545 мм; цього ж прокату після механічної обробки – 0,534 мм; найменші показники корозії отримані після піскоструминного очищення або полірування – 0,532 мм [135]. Крім того спостерігалось сповільнення корозії за рахунок утворення плівки іржі після двох років тривалості експерименту. При дослідженні корозії автомобільних кузовів дослідниками встановлено, що плівки іржі, що утворюються на повітрі та в закритих порожнинах суттєво відрізняються хімічним складом та захисними властивостями. Що в свою чергу потребує різних способів АЗ.

Сам виробничий процес не має суттєвого впливу на корозійні характеристики сталі. Невеликі зміни складу, що виникають під час виплавки різних партій сталі однієї марки, проявляються слабо. Виключенням є вплив на властивості сталі вміст міді. Додавання в сталь 0,2% міді призводить до підвищення корозійної стійкості на повітрі в 2–3 рази. Зміна концентрації інших елементів у звичайних сталях слабо впливає на швидкість протікання корозії. Корозія дещо сповільнюється при підвищенні вмісту вуглецю, марганцю та кремнію. Наприклад, на відкритому повітрі швидкість утворення іржі для сталі, що містить 0,2% кремнію на 10% менше, ніж для подібної сталі з 0,02% кремнію [135].

На швидкість протікання атмосферної корозії впливає маса кузова, оскільки від неї залежить тривалість вирівнювання температури поверхні з температурою навколишнього середовища. Це, в свою чергу, визначає кількість вологи і час протягом якого поверхня кузова залишається вологою після дощу або роси. Тому правильне раціональне проектування кузова автобуса із мінімальним використанням металу та забезпечення рівноцінної міцності,

дозволить зменшити конденсацію вологи та знизити ймовірність виникнення локальних уражень [136].

Підприємства по виготовленню автобусів постійно підвищують ефективність АЗ кузовів автобусів. З цією метою застосовують нові матеріали з підвищеною корозійною стійкістю. Впроваджують технології покриттів, що зменшують негативний вплив різних чинників на корозію кузова автобуса [137]. Як відомо, виготовлення кузова автобуса не обходиться без зварювальних робіт. При цьому зварювальні шви чи точки є осередками корозії. Тому для підвищення корозійної стійкості кузова потрібно виконувати захист зварних швів або зменшити кількість зварних швів чи точок. На перший погляд зменшення кількості точок зварювання може погіршити міцність кузова, однак із застосування сучасних матеріалів та технологій їх виготовлення є можливим.

На рис. 4.34 зображено КК автобуса, який після зварювання не має захисного покриття. Якщо до такого кузова приварювати обшивку, а потім здійснювати АЗ, як було раніше, то між обшивкою і каркасом кузова залишиться взагалі непокритий метал. У результаті чого з першого дня експлуатації вже інтенсивно розвиватиметься корозійний процес. Такий автобус буде експлуатуватись доти, доки не зруйнується сам КК під дією корозії. Зовні такий автобус матиме досить пристойний вигляд. Крім того, автобуси в цих місцях, котрі заварені (закриті порожнини), неможливо проконтролювати під час експлуатації. На практиці неодноразово були такі випадки, коли знімали кузов з рами, то він просто розвалювався. Наслідки такої недосконалої конструкції можна побачити через 5–9 років експлуатації автобуса із кузовом несівної конструкції (рис. 2.20, *a*). Дуже рідко експлуатуючі організації, щоб закрити непокритий метал, подавали антикорозійний засіб (типу «Мовіль») під тиском у щілини між каркасом і обшивкою. Це потребувало зняття всього внутрішнього облицювання кузова. При цьому автобус простоював. Все це потребувало фінансових та трудових витрат. У результаті цього термін експлуатації дещо збільшувався, і ці витрати

були недаремними. Але все ж таки наслідки такої недосконалої конструкції можна побачити через 5–9 років експлуатації автобуса із кузовом несівної конструкції (рис. 2.20, *a*).

Більші терміни експлуатації стосуються автобусів із додатковим покриттям і в містах із меншою кількістю жителів.

Тому прийнято рішення розробити таку технологію виготовлення кузова автобуса, яка б передбачала повну попередню антикорозійну обробку кузова [138]. Враховуючи те що на виробництві кардинально різкий перехід від однієї технології до іншої не виконується, перехід від застарілої технології повинен пройти в декілька етапів. Причому важливо побачити результати експлуатації автобусів із нововведеннями, провести ресурсні випробування.

З цією метою концептуально запропоновано три можливих варіанти вдосконалення технологій виготовлення кузовів автобусів.

Перший варіант передбачає попереднє покриття каркасу кузова високоадгезійним антикорозійним ґрунтом згідно ISO 12944-1:2017. При цьому місця приварювання обшивки заклеюються малярною клейкою стрічкою. Потім після висихання ґрунту малярна стрічка знімається, і непокриті місця покриваються струмопровідним ґрунтом. На рис. 5.2 зображено КК, котрий вже покритий високоадгезійним антикорозійним ґрунтом.



Рисунок 5.2 – КК автобуса після покриття високоадгезійним ґрунтом, де у місцях приварювання обшивки наклеюється малярна клейка стрічка

Після висихання струмопровідного ґрунту приварюється облицювання із двостороннім цинкуванням (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – КК автобуса, котрий має приварене облицювання із двостороннім цинкуванням

На цих автобусах для підвищення корозійної стійкості та довговічності використовуються приклеєні склопластикові задня та передня маски облицювання. Передній та задній бампер виготовляються також із склопластику. На відміну від масок, бампери кріпляться механічним шляхом. Оскільки дах автобуса найменше підлягає корозійним пошкодженням, облицювання його запропоновано і надалі виготовляти зі сталевих листів без цинкового покриття. Сталеві листи приварюються. Після повного циклу зварювання та приклеювання передньої та задньої масок кузов транспортується в цех чорнових малярних операцій. Тут кузов підготовлюється, покривається антикорозійним ґрунтом марки Helios. Елементи кузова, що направлені до дорожнього полотна, покривають спеціальною антикорозійною мастикою марки Dinitrol.

Потім, згідно розробленої технології, обробляються закриті порожнини каркасу труб автобуса консервантом закритих порожнин марки Dinitrol. За старими технологіями закриті порожнини взагалі не оброблялись, у крайньому

випадку захищались тільки пороги. Обробка закритих порожнин покладалась на експлуатуючі організації, які в основному ігнорували проведення додаткового АЗ. Також не передбачалися технологічні отвори в кузові для подачі антикорозійної рідини. Тому це ще більше ускладнювало антикорозійну обробку. При безсистемному свердлінні отворів у місцях, не передбачених заводом-виробником, неминуче виникало додаткове послаблення кузова.

В результаті аналізу ВР кузовів автобусів встановлено, що КК підлягає інтенсивним корозійним процесам тільки нижче підвіконного бруса. Причому каркас передньої частини кузова надійно захищений передньою маскою та бампером. Крім цього, передня частина автобуса краще вентилюється та просушується від нагрітого двигуна. Тому обробка закритих порожнин запропонована наступним чином. Обробці, в першу чергу, підлягає каркас основи (рис. 5.4) на 100%, оскільки корозійні руйнування каркасу основи призводять до унеможливлення подальшої експлуатації автобуса.

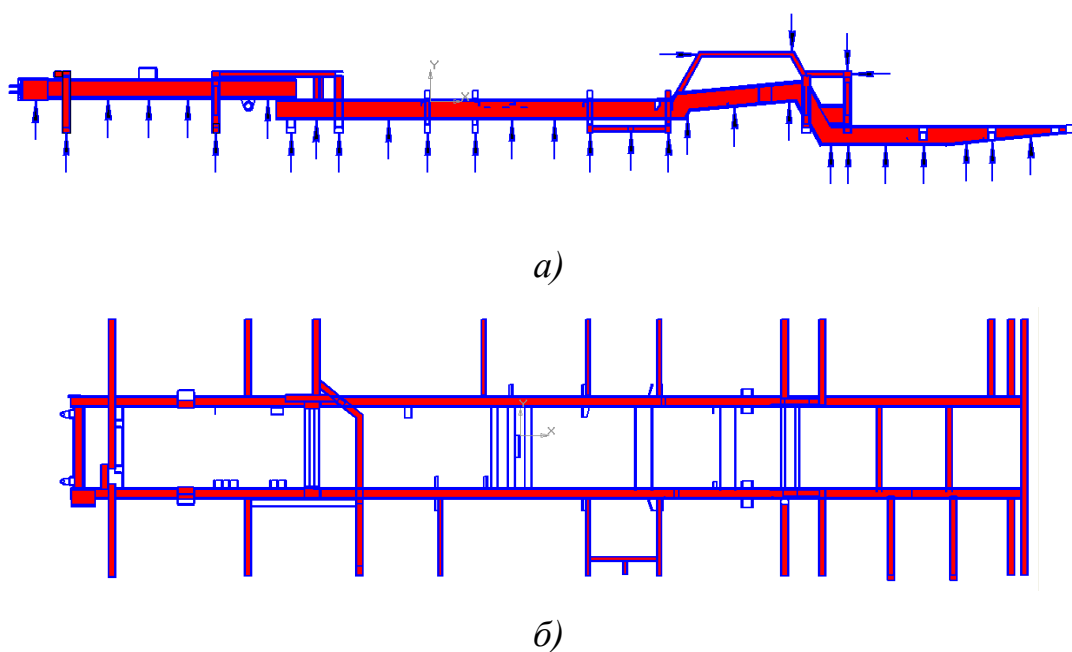


Рисунок 5.4 – Схема обробки каркасу основи кузова автобуса: *а)* – вид збоку; *б)* – вид зверху

В місцях подачі антикорозійної рідини свердляться технологічні отвори, діаметром 10 мм, в які під тиском 10–15 кгс/см² подається речовина Dinitrol.

Для нормального проникнення антикорозійної рідини температура в приміщенні малярного цеху не повинна опускатись нижче 20 °С. Потім після витікання зайвої антикорозійної рідини з технологічних отворів, вони закриваються спеціальними пробками.

Каркас задньої частини кузова кородує під заднім бампером, оскільки в цьому місці накопичується бруд та волога. В зимовий період, при посипанні дорожнього полотна соляно-пісчаними сумішами проти обмерзання, під заднім бампером утворюється агресивне середовище для інтенсивного розвитку корозії. Тому низ каркасу задньої частини кузова потребує зовнішньої обробки мастикою, а внутрішні порожнини – антикорозійною рідиною Dinitrol. На рис. 5.5 зображено схему нанесення антикорозійної рідини в закриті порожнини каркасу задньої частини кузова.

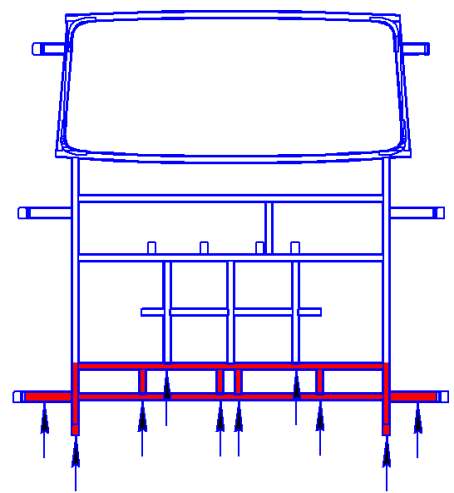
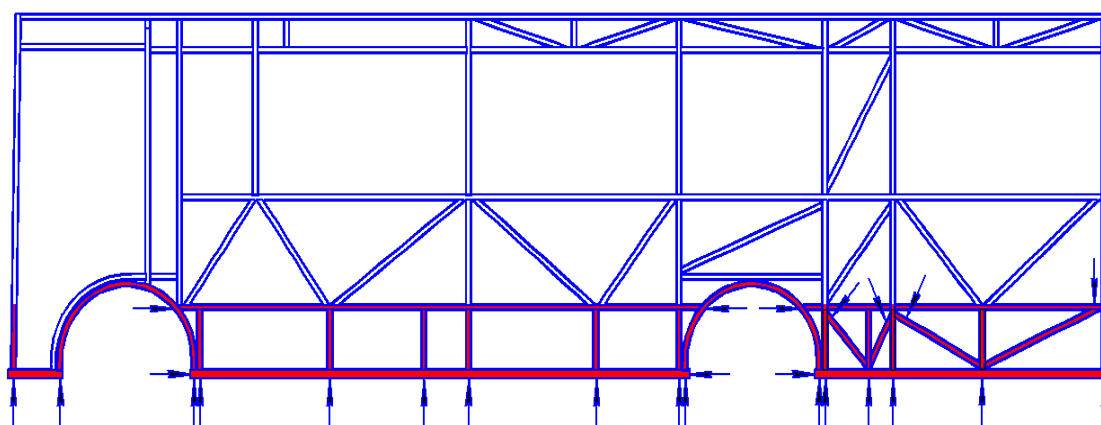


Рисунок 5.5 – Схема обробки каркасу задньої частини кузова автобуса

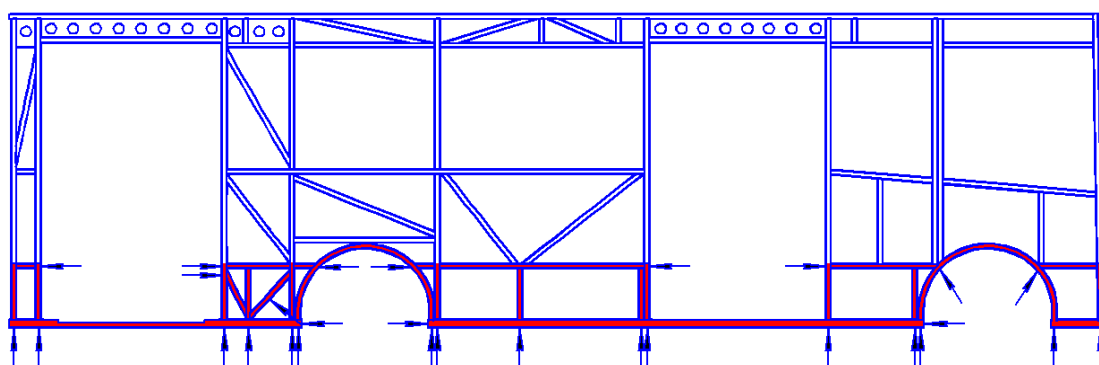
Як показує досвід експлуатуючих організацій, КК при застосуванні застарілої технології інтенсивно кородує нижче підвіконного бруса. Враховуючи те що згідно нової технології КК запропоновано спочатку обробляти ґрунтом, а потім приварювати облицювання, інтенсивність корозії повинна суттєво зменшитись нижче підвіконного бруса. Тому запропоновано обробляти закриті порожнини нижче підвіконного бруса таких елементів: порогів та каркасу колісних арок. Обробці також підлягають всі інші труби на

рівні багажних та допоміжних відсіків: відсік повітряного фільтру, відсік паливного баку, відсік автономного опалювача, відсік акумуляторних батарей. Також у відкритих відсіках труби каркасу зовні покриваються антикорозійною мастикою. На рис. 5.6 зображено схему обробки каркасів обох боковин автобуса.

Після обробки в цеху чорнових малярних операцій автобус направляється в цех чистових малярних операцій. Тут автобус готується до фарбування (шпаклюється за потреби), покривається чистовим ґрунтом. Після висихання ґрунту покривається фарбою і лаком Helios. Покриття лаком підвищує вартість автобуса, тому вид даного покриття повинне обговорюватись із споживачем. Дана технологія виготовлення кузова передбачає встановлення стекол у гумових ущільнювачах із фіксацією по периметру класичним замком круглого перерізу.



а)



б)

Рисунок 5.6 – Схема обробки каркасів правої та лівої боковин кузова автобуса: а) – каркас лівої боковини; б) – каркас правої боковини

При другому варіанті розроблена більш досконала технологія виробництва кузова та буде мати ряд відмінностей від попередньої. По-перше, КК після зварювання буде повністю без пропусків покриватись високоадгезійним антикорозійним ґрунтом, за винятком місць приварювання обшивки даху (рис. 5.6), де у цих місцях наклеюється малярна клейка стрічка.



Рисунок 5.7 – КК автобуса, котрий покритий високоадгезійним антикорозійним ґрунтом

У місцях приварювання обшивки даху КК покривається струмопровідним ґрунтом. Бічні панелі виготовляються з листів із двостороннім покриттям цинку. Запропоновано по периметру металевих листів формувати кромки для приклеювання та підвищення жорсткості. Запропоновано ці панелі приклеювати за допомогою універсальних клеєвих сумішей Sicaflex, що до

цього часу не набули широкого використання в автомобілебудуванні. Для підвищення адгезії КК та облицювання бічних панелей у місцях приклеювання попередньо покриваються рідиною Primer, що поліпшує адгезійні властивості. На рис. 5.8 зображені бічні панелі облицювання з двостороннім цинкуванням у процесі їх приклеювання.



Рисунок 5.8 – Кузов автобуса з приклеєними бічними панелями із двостороннім покриттям цинку

Таким чином, дана технологія виготовлення кузова передбачає приклеювання всіх панелей облицювання (пластикові – передня і задня маски, з двостороннім цинкуванням – бічні панелі), крім облицювання даху. Облицювання даху виготовляється із сталевого прокату без цинкування. На рис. 5.9 зображено кузов автобуса, який виготовляється за другим варіантом технології з привареним дахом та приклеєним облицюванням та підготовлений до подальших малярних робіт.



Рисунок 5.9 – Кузов автобуса, з привареним дахом та приклеєним облицюванням, підготовлений до подальших малярних робіт

Дана технологія передбачає також приклеювання всіх нерухомих стекол: вітрового, заднього та бічних. На рис. 5.10 зображений готовий автобус, що виготовлений згідно другого варіанту технології забезпечення належного антикорозійного захисту кузова.



Рисунок 5.10 – Автобус, що виготовлений згідно другого варіанту технології забезпечення належного антикорозійного захисту кузова

Рухомі стекла вмонтовуються у каркасах, які потім також вклеюються в пройми. Для забезпечення належної адгезії кожне скло у місці приклеювання покривається активатором та праймером, відповідні панелі кузова покриваються праймером, а вже потім наноситься клей Sicaflex. Деталі, що склеюються, надійно фіксуються до повного висихання клею з дотриманням зазорів по всьому периметру. Для унеможливлення перекосів пройми стекол, що призведе до тріщин самих стекол, здійснюється контроль пройм спеціальними шаблонами. Після збирання кожний автобус обов'язково повинен пройти камеру дощування для перевірки кузова на герметичність. У разі виявлення протікань, негерметичний елемент зрізується та переклеюється з дотриманням усіх переходів технології. Для зрізання стекол, щоб їх не пошкодити, використовується стальна струна. Після того, як кузов перевірений на герметичність, виконується розшивка герметиком між вклеєними стеклами. Розшивка проводиться для усунення потрапляння вологи, бруду і пилу та для зменшення вібрацій стекол. Також наявність розшивки запобігає проникненню води та її замерзанню, що може призвести до відклеювання стекол. Вклеєні стекла, на відміну від вставних у гумові ущільнювачі, додатково підвищують жорсткість кузова, що забезпечує належну рівномірність кузова.

Третій варіант технології включає в себе найсучасніші елементи конструкції виготовлення кузова з використанням максимальної кількості полімерних матеріалів. Це підвищує корозійну стійкість кузова автобуса та зменшує його масу. Дана технологія відрізняється від попередньої тим, що бічні панелі обшивки кузова виготовляються з полімерних листів із двостороннім покриттям алюмінієвої плівки (типу Алюкобонд). Такі листи приклеюються згідно технології другого варіанту (рис. 5.11, рис. 5.12).



Рисунок 5.11 – Кузов автобуса, бічні панелі якого обшиті з полімерними листами з двостороннім покриттям алюмінієвої плівки (типу Алюкобонд)

Полімерні листи з двостороннім покриттям алюмінієвої плівки запропоновано для виготовлення обшивки кузовів автобусів (рис. 5.12).



Рисунок 5.12 – Автобус ТУР А407, на якому облицювання виконується композитними матеріалами (типу Алюкобонд)

Аналогічна технологія (рис. 5.11, рис. 5.12) спочатку використовувалась на DEN OUDSTEN у Голландії. Застосування композитних матеріалів

забезпечують ще кращий захист від корозії кузова та водночас міцність кузова на належному рівні. Це підтверджується засобами сучасного комп'ютерного моделювання та досвідом експлуатації в Україні, Голландії та інших державах.

У даному варіанті технології виготовлення кузова автобуса (рис. 5.11) передня та задня маски виготовляються із склопластикових панелей.

Таким чином, максимальне використання полімерних матеріалів при виготовленні обшивки каркасу кузова автобуса покращує його корозійну стійкість та зменшує масу. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють проводити розрахунки на міцність кузовів автобусів із використанням полімерних матеріалів. Важливим при розрахунку кузова автобуса є забезпечення його рівномірності. Одним із малодосліджених компонентів при приклеюванні облицювання автобусів були клеючі суміші. Невідомо було, яким чином поведуть в експлуатації приклеєні панелі облицювання кузова автобуса. Тому було прийнято рішення провести лабораторні випробування приклеєних зразків облицювання до елементів каркасу кузова із урахуванням процесу старіння.

5.2.2 Результати випробування клеючих сумішей із поверхнями приклеювання щодо їх адгезійних властивостей

Оскільки для приклеювання облицювання запропоновано клеєві суміші та склопластикове облицювання, що раніше не використовувались в автомобілебудуванні, було проведено експериментальні дослідження адгезійних властивостей запропонованих клеєних з'єднань згідно ISO 4587. Для створення умов, що відповідають реальній експлуатації, старіння зразків проводилось згідно стандарту CQP – 034 [139] у поєднанні із ISO 11997-1:2017.

Провівши ряд випробувань, отримано результати, що підтверджують застосування приклеювання бічних панелей при когезійному розриві понад 95%. При значення менших, ніж 95% варіанти не допускаються до застосування на практиці. Для оцінки відповідності належної адгезії з кожної вибірки зразків обрано найменше значення когезійного розриву. В табл. 5.1 наведено результати перевірки зразків з кожної вибірки.

Таблиця 5.1 – Результати перевірки адгезійних властивостей зразків

Марка клею	Марка засобів обробки перед склеюванням		
	Sica Aktivator – 100	Sica Aktivator – 100+Primer 206 G+P	Sica Aktivator– 205
Sicaflex – 221 чорний	Когезійний розрив, 97,42 ± 1,71%	Когезійний розрив, 76,86 ± 1,34% (10% відшарування праймеру після зберігання у воді)	–
Sicaflex – 252 чорний	Когезійний розрив, 96,42 ± 1,71%	Когезійний розрив, 97,00 ± 1,70%	–
Sicaflex – 252 АТ білий	–	–	Когезійний розрив 96,43 ± 1,69%
Sicaflex – 252 АТ чорний	–	–	Когезійний розрив 74,44±1,31%
Sicaflex – 263	Когезійний розрив, 96,57±1,73%	Когезійний розрив, 97,00±1,70%	–
Sicaflex – 265	Когезійний розрив, 97,14±1,70%	Когезійний розрив, 97,14±1,70%	–

Як показують результати випробування (табл. 5.1), використання кращих клеєвих сумішей Sicaflex забезпечує когезійний розрив понад 95%. Це дозволило впровадити універсальні клеєві суміші Sicaflex, які раніше не використовувались за таким призначенням, у реальне виробництво.

В результаті вдосконалення технологій кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності отримано нові перспективні технології виробництва кузовів із використанням сучасних полімерних засобів. Запропоновані матеріали, які раніше не використовувались у автомобілебудуванні. За існуючими технологіями кузов взагалі не покривався ґрунтом перед приварюванням елементів обшивки (рис. 4.34). За новою технологією повне покриття каркасу

кузова високоадгезійним антикорозійним ґрунтом (рис. 5.2) забезпечує підвищення довговічності кузова автобуса. Таку технологію впроваджено на автобусах марки «Атаман», що виготовляються на АТ «Черкаський автобус». На відміну від попередніх модифікацій, на цих автобусах «Атаман» А092Н6 обробляються закриті порожнини згідно схем (рис. 5.4–5.6) через технологічні отвори. Використання технологічних отворів на основі конструкторської документації в заводських умовах попереджає послаблення кузова у випадку самостійного свердління отворів при їх відсутності. Приклеюється бічне облицювання із сталевих листів з двостороннім цинкуванням (рис. 5.8), а також вклеюються всі нерухомі стекла вікон.

Автобуси «Атаман» А092Н6 із вдосконаленою технологією АЗ почали експлуатацію у м. Київ у 2016 році (термін експлуатації сім років). У цих автобусах КК в задовільному стані і не потребує ВР. Автобуси попередніх років виробництва, при експлуатації у містах із кількістю жителів понад 1 млн, вже через п'ять років ставали на ВР (рис. 2.20). Подальша експлуатація покаже у скільки разів підвищиться довговічність кузова із вдосконаленою технологією.

На нових шкільних автобусах «Атаман» D093S2/S4 застосовано спрощену технологію, де також впроваджено деякі прогресивні технічні рішення. Бічні сталеві панелі з двостороннім цинкуванням (рис. 5.3) приварюються до кузова, попередньо покритого високоадгезійним антикорозійним ґрунтом. При чому у місцях зварювання наноситься струмопровідний ґрунт. Закриті порожнини обробляються аналогічно до запропонованих схем (рис. 5.4–5.6). Такі автобуси експлуатуються з 2015 року у всіх регіонах України. Стан кузовів шкільних автобусів «Атаман» D093S2/S4 дещо краще, ніж А092Н6. Це пояснюється тим, що міські автобуси А092Н6 перевозять пасажирів із періодичними перевантаженнями (у годину пік) при середньому річному пробігу 70–100 тис. км. Річний пробіг шкільних автобусів не перевищує 20 тис. км. Таким чином, як показує реальна експлуатація, для шкільних автобусів недоцільно далі поліпшувати технологію кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності. Такі вдосконалення призведуть, в першу чергу,

до підвищення вартості автобуса.

На відміну від шкільних автобусів міські автобуси потребують подальшого вдосконалення технологій виготовлення та АЗ. Зокрема в Німеччині встановлюються вимоги по збільшенню термінів експлуатації автобусів до двадцяти років. Тому на підприємстві ВАТ «Укравтобуспром» (м. Львів, Україна) впроваджено у виробництво найкращу із запропонованих технологій кузова автобуса в аспекті корозії і довговічності (третій варіант). Основна відмінність від технології виробництва кузова «Атаман» А092Н6 полягає у використанні бічних панелей із полімерними листами (типу Алюкобонд), які вперше впроваджено в автомобілебудуванні. Використання листів Алюкобонд у порівнянні зі сталевими листами дорожче у два рази, однак ресурс полімерних листів більше у 10 разів. Один із таких проєктів було розроблено для перевезення пасажирів у містах Німеччини. Крім того довговічність кузова до двадцяти років, при розробці на ВАТ «Укравтобуспром», забезпечується дотримання умов рівномірності каркасу кузова з використанням сучасних прикладних програм проєктування. Надійність та довговічність нових матеріалів, які до цього часу не використовувались у автомобілебудуванні, перед впровадженням у виробництво обов'язково підтверджується натурними випробуваннями. Перед впровадженням у виробництво було проведено дослідження адгезійних властивостей клеючих сумішей, які в процесі старіння не повинні втрачати свої властивості. У табл. 5.1 показано результати випробувань, які дозволяють обрати оптимальні матеріали для застосування на виробництві. Під час випробувань встановлено, що більшість зразків показали когезійний розрив, більше 95%. Це значить, що при прикладенні зусилля, яке перевищує міцність клею на розрив, 95% розриву відбувалося по самому клею. Такі результати лабораторних випробувань дозволяють стверджувати, що запропоновані ключі суміші можна застосовувати у автомобілебудуванні, оскільки вони забезпечать надійне приклеювання панелей облицювання автобуса.

Отже, отримані рішення дозволяють поліпшити корозійну стійкість

кузовів автобусів відповідно до конкретних умов експлуатації. По-перше, застосування бічних композитних панелей, що приклеюються, дозволяє у 2,5–3 рази скоротити сумарну протяжність зварних швів, що є локальними осередками появи корозії. По-друге, повне покриття каркасу кузова антикорозійним ґрунтом перед приварюванням чи приклеюванням облицювання дозволяє забезпечити суцільний захист каркасу від корозії. По-третє, раціональна обробка закритих порожнин додатково підвищує корозійну стійкість каркасу кузова.

Застосування отриманих, рівноцінних по корозійному захисту рішень дозволяє відмовитися від використання катафорезних ванн. Заправка однієї ванни складає близько 40 тис. доларів. Крім високої вартості заправки ванни вона має ряд обмежень і проблем із утилізацією відходів. Кількість занурень у ванну та термін придатності катафорезного розчину обмежені. Така ванна ефективно працюватиме тільки при випуску не менше 3000 автобусів у рік (у реальному виробництві не більше 400 одиниць у рік). Незважаючи на здорожчання технології АЗ, у порівнянні із старою технологією, розроблена технологія набагато дешевше та ефективніше катафорезних покриттів.

Застосування передньої та задньої масок із склопластику дозволяє в умовах виробництва швидко переналадити виробництво відповідно до нових дизайнерських рішень кузова автобуса (рис. 5.11). Бічні панелі з матеріалу Алюкобонд мають ідеальну рівну поверхню для фарбування. Між приклеєними бічними панелями для компенсації температурних та механічних деформацій передбачено зазори 5–10 мм. Щоб зберегти належний естетичний зовнішній вигляд, дані зазори заповнюються герметиком для розшивки. Крім належного естетичного вигляду листи з матеріалу Алюкобонд у поєднанні із герметичною розшивкою забезпечують зниження шумових ефектів при експлуатації автобуса.

При застосуванні запропонованих технологій на практиці ресурс кузова автобуса з полімерними панелями типу Алюкобонд буде не менше двадцяти років. Довговічність полімерних листів типу Алюкобонд підтверджується

довготривалою їх експлуатацією в якості обшивки багатопверхових каркасних будинків з термінами експлуатації понад тридцять років. Такі матеріали спеціально спроектовані для експлуатації при широких інтервалах температур та під дією ультрафіолетового випромінювання. Більш детальний прогноз можна провести в подальших дослідженнях із застосуванням ІМ, методологія та результати якого наведені у роботі [90], в якій обґрунтовано вплив піщано-соляних сумішей на кузов автобуса. Враховано також заводський захист закритих порожнин, без оновлення якого інтенсифікується корозійний процес через два роки експлуатації автобуса.

Як було сказано, що комплект полімерних листів типу Алюкобонд у порівнянні з цинкованими листами дорожче у два рази. Але при застосуванні клеєних бічних панелей сумарна довжина зварних швів зменшується у 2,5 рази. Зменшення сумарної довжини зварних швів призводить до економії деяких статей витрат. У 2,5 разів забезпечується економія матеріалів на зварювання: зварювальний дріт та вуглекислота. У 2,5 менше витрати електроенергії на виконання зварювальних робіт та зменшується оплата праці зварювальників. Згідно даних планово-фінансового відділу АТ «Черкаський автобус», застосування нової технології з використанням полімерних композитних матеріалів призводить до підвищення собівартості виготовлення автобуса приблизно на 1200 доларів США. Однак довговічність такого кузова буде більшою мінімум у два рази, що компенсує в подальшому витрати через дев'ять років на ВР. Мінімальна вартість ВР кузова складає близько 3500 доларів США, що продовжує загальний ресурс автобуса лише у 1,5 рази.

При впровадженні у виробництво слід враховувати також обмеження використання представлених технологій. Такі технології можуть тільки застосовуватись на автобусах, кузова яких виготовляються із сталевих труб прямокутного профілю. Обклеювання боковин каркасу кузова полімерними листами типу Алюкобонд повинно здійснюватись тільки на плоских бічних поверхнях (без деформацій листів). До вигнутих ділянок каркасу кузова слід приварювати або приклеювати листи із двостороннім цинкуванням, при

формуванні відповідного профілю листів.

До недоліків дослідження слід віднести підвищену собівартість реалізації запропонованих технологій на стадії виготовлення кузова автобуса, у порівнянні з базовими технологіями. Відповідно такі рішення призведуть до збільшення вартості автобуса.

Розвиток даного дослідження може полягати в оцінці впливу інших полімерних матеріалів на корозійну стійкість кузовів автобусів з метою зменшення вартості технологічних рішень. При чому здешевлення технологій не повинно спричинити погіршення корозійної стійкості.

Слід зауважити, що при високотехнологічному антикорозійному заводському захисті кузова не треба ігнорувати оновленням АЗ під час експлуатації автобуса.

5.3 Антикорозійний захист кузова під час експлуатації

5.3.1 Вплив експлуатаційних та атмосферних факторів на протікання корозії

У металевих деталях кузова автобуса під час експлуатації найчастіше зустрічається електрохімічний тип корозії, при якому відбувається взаємодія металу з розчином електроліту, адсорбованого з повітря, і яка з'являється в результаті як прямого попадання вологи на незахищені металеві поверхні кузова, так і в результаті утворення конденсату в його міжобшивальному просторі (між внутрішніми і зовнішніми панелями дверей, боковин, даху тощо). Особливо сильно розвивається корозія в місцях, важкодоступних для огляду і очищення в невеликих зазорах, а також у відбортовках і загинах кромek, де волога, що періодично потрапляє в них, може зберігатися тривалий час.

В нішах колісних арок може збиратися бруд, сіль і волога, стимулюючи процес розвитку корозії; днище кузова недостатньо стійке до дії чинників, збуджуючих корозію. На швидкість корозії великий вплив має склад атмосфери, її забрудненість різними домішками (викидами промислових підприємств, такими, як двоокис сірки, що утворюється в результаті спалювання палива; хлористий амоній, що потрапляє в атмосферу унаслідок

випару морів і океанів; тверді частки у вигляді пилу), а також температура довкілля тощо. Тверді частки, що містяться в атмосфері або кузові, що потрапляють на поверхню з полотна дороги, викликають також абразивний знос металевої поверхні кузова. З підвищенням температури швидкість корозії зростає (особливо за наявності в атмосфері агресивних домішок і вмісту вологи).

Зимові покриття доріг сіллю для видалення снігу і криги, а також робота автобуса на морському побережжі приводять до збільшення корозії.

Корозійні руйнування в кузові зустрічаються й у результаті контакту сталевих деталей із деталями, виготовленими з деяких інших матеріалів (дюралюмінію, каучуків, що містять сірчисті з'єднання, пластмасовими на основі фенольних смол), а також у результаті контакту металу з деталями, виготовленими з дуже вологого пиломатеріалу, що містить помітну кількість органічних кислот.

Дослідження показали [135], що при контакті сталі з поліізобутиленом швидкість корозії металу в добу складає 20 мг/м^2 , а при контакті цієї ж сталі з силіконовим каучуком – 321 мг/м^2 у добу. Цей вигляд корозії спостерігається в місцях постановки різних гумових ущільнювачів, у місцях прилягання до кузова хромованих декоративних деталей.

До появи корозії на поверхні деталей кузова приводить також контактне тертя, що має місце при одночасній дії корозійного середовища і тертя, при коливальному переміщенні двох поверхонь металу однієї відносно іншої в корозійному середовищі. Цьому виду корозії підлягають двері по периметру, люки та інші металеві частини кузова.

При фарбуванні автобусів може мати місце забруднення ретельно підготовлених до покриття поверхонь кузова вологими руками і забрудненим повітрям. Це також при неякісному покритті призводить до корозії кузова.

Процес корозії кузовів відбувається або рівномірно на значній площі (поверхнева корозія), або роз'їдання йде вглиб металу, утворюючи глибокі

місцеві руйнування – раковини, плями в окремих точках поверхні металу (точкова корозія).

Суцільна корозія менш небезпечна, чим місцева, яка приводить до руйнування металевих частин кузова, втрати його міцності до різкого зниження межі корозійної втоми і до корозійної крихкості, характерної для облицювання кузова.

Залежно від умов роботи, сприяючих виникненню корозії, деталі і вузли кузова можуть бути поділені на відкриті поверхні, що обернені до полотна дороги (каркас підлоги, арки коліс, пороги кузова), на поверхні, які знаходяться в межах об'єму кузова (каркас, рама, багажні відділення) і на поверхні, які утворюють закритий ізольований об'єм (приховані частини каркасу, рами низ зовнішнього облицювання дверей тощо).

Під час експлуатації автобуса днище кузова і арки коліс піддаються інтенсивній дії піску, каменів, соляного розчину взимку. Тому корозійне покриття інколи зношується до металу, а сам метал дуже швидко руйнується. Відповідно в процесі експлуатації автобусів важливо підтримувати цілісність лакофарбового покриття, АЗ на відкритих поверхнях та виконувати періодичну обробку закритих порожнин.

5.3.2 Захист кузова від корозії

Належне технічне обслуговування з першого дня експлуатації та кваліфікований поточний ремонт автобуса позитивно впливає на його технічний стан [136] та дозволяє збільшити ресурс автобуса вцілому.

Новий автобус перед початком експлуатації доцільно уважно оглянути, визначити, чи немає незахищених мастикою місць, відшаровувань покриття, особливо у важкодоступних місцях. Невиявлені дефекти дуже швидко дадуть про себе знати у вигляді уражених корозією ділянок.

Для захисту кузова існує багато хімічних засобів. Хімічні засоби виконують естетичну і техніко-експлуатаційну функції. З одного боку, вони при малих матеріальних витратах дозволяють зберегти красивий зовнішній

вигляд, з іншої – захищають метал від корозії, подовжують термін служби автобуса [137].

На довговічність автобуса впливають фактори, які закладені на ЕП, виробництва, а також у процесі експлуатації. На ЕП підбираються матеріали кузова автобуса, способи їх з'єднання, засоби АЗ. На стадії виготовлення автобуса важливо відслідковувати відповідність технології виробництва та конструкторської документації. Під час проєктування в конструкцію закладається можливість поновлення АЗ під час експлуатації. При оновленні АЗ з доступом до днища автобуса проблеми майже не виникають. При оновленні АЗ закритих порожнин автобуса, що вже знаходиться в експлуатації, можуть виникати ускладнення. З метою доступу до скритих порожнин виконуються технологічні отвори. Для максимальної швидкодії операцій кількість отворів повинна бути мінімальною. При цьому внутрішні порожнини каркасу повинні бути сполученими для проникнення консервуючих засобів, що і забезпечить мінімальну кількість технологічних отворів.

Під час експлуатації на РКА впливають умови експлуатації та своєчасне якісне оновлення АЗ. Нормальні умови експлуатації – це перевезення пасажирів у кількості, що не перевищує технічно допустиму, рух по дорогах I–III категорій зі швидкістю, що не перевищує 50 км/год у місті. Однак у реаліях експлуатації, при перегонах перевізників за прибутком, досить часто спостерігається перевантаження, рух з підвищеними швидкостями до дорогах низької якості (з вибоїнами, бруківка тощо). В результаті такої експлуатації неминуча поява втомних тріщин в елементах каркасу кузова та потреба у ВР. Такі ремонти супроводжуються простоями і, як наслідок, додатковими витратами. Витрати на ремонт та збитки від простою можуть перевищувати той прибуток, ціною якого було виведено автобуси із ладу. Тому в даній ситуації для зменшення негативного впливу ненормальної експлуатації автоперевізникам слід вжити заходів, щоб звести негативні чинники до мінімуму.

Враховуючи можливості сучасних комп'ютеризованих технологій автоматизованого проектування, доцільно розробити оптимальні маршрути руху міського транспорту для більш ефективного використання автобусів на маршрутах. Для зручності пасажирів увести мобільні додатки, що дозволяють відслідковувати пасажирам рух громадського транспорту міста. Такі додатки були вже випробувані на деяких маршрутах м. Черкаси ще в 2012 році, однак широкого розповсюдження почали набувати лише у 2022 році. Також при розробці нових узгоджених маршрутів потрібно і вдосконалювати інфраструктуру міста. Проводити капітальний ремонт доріг із паралельним облаштуванням зупинок із заїздами для посадки-висадки пасажирів. Крім того, важливо розвивати добросесність та культуру водіїв автобусів громадського транспорту. Такий раціональний підхід до експлуатації також дозволить позитивно вплинути для поліпшення технічного стану кузовів автобусів.

Наступним кроком по підвищенню довговічності кузова автобуса буде проведення своєчасного оновлення АЗ. А саме: усунення пошкоджень лакофарбового покриття, покриття днища мастикою від наслідків руху по дорогах низької якості (рис. 2.5).

Також одним із важливих заходів є поновлення захисту закритих порожнин один раз у два роки експлуатації. За заводом-виробником, як правило, передбачаються технологічні отвори для проведення антикорозійної обробки закритих порожнин. Для прикладу представимо технологію оновлення антикорозійного покриття поширеного в Україні автобуса «Атаман» А092Н6.

Перед нанесенням антикорозійного покриття автобус підлягає мийці та ретельному просушуванню. Для підвищення ефективності відновлення доцільно проводити АЗ влітку, при температурі навколишнього середовища вище 20 °С. Технологічні отвори для подачі антикорозійних засобів для обробки закритих порожнин, як правило, закриваються пробками. Після демонтажу пробок внутрішні порожнини перевіряються на наявність бруду, пилу, вологи, іржі та стану антикорозійного покриття. При потребі необхідно промити закриті порожнини гарячою водою, при температурі 50–70 °С до

витікання чистої води. Після промивки потрібно, щоб вода повністю витекла із закритих порожнин елементів каркасу кузова. Потім продути труби стиснутим повітрям та дати витримку часу до повного їх висихання.

Для оновлення АЗ зазвичай використовується консервант пороїв «Мовіль» або його спрощені модифікації «Мовіль-1» та «Мовіль-2», рекомендована товщина нанесення яких становить 20–40 мкм.

Якщо розглянути властивості антикорозійних рідин (табл. 5.2) [140] то слід відзначити, що «Мовіль» без індексів має явну перевагу над його послідовними модифікаціями.

Таблиця 5.2 – Порівняльні характеристики антикорозійних рідин за результатами досліджень [140]

Марка нафтового складу	Час до появи корозії, годин		Тиксотропність продукту	Проникаюча здатність продукту, мм	Теплостійкість плівки, °С	Вплив на лакофарбове покриття
	В термо-волого-камері	В камері 5%-го соляного туману				
Мовіль	2000	1000	-	80	70	Незначний
Мовіль-2	-	300	-	90	80	Незначний
Автоконсервант кузова	600	4	-	-	70	Не впливає

Антикорозійна рідина для обробки закритих порожнин повинна мати такі основні характеристики:

- висока ефективність захисту від корозії;
- довготривалий захист від корозії;
- ефективне витіснення води;
- висока здатність проникнення;
- припинення процесу корозії при нанесенні покриття;
- еластичність.

Якщо розглянути асортимент сучасних засобів захисту від корозії то можна побачити, що є в продажу «Мовіль» з індексом «2», «Унікум», «2А - Трейд», «Люкс», «Oil Right» тощо, відповідно до технічних умов підприємства, де вони виготовляються. При цьому дослідження ефективності захисту від корозії не проводились. Тому доцільним буде використання засобів, які пройшли випробування на ефективність та стійкість покриття.

Сучасним аналогом на сьогодні є антикорозійна рідина Dinitrol ML [141], характеристики якого наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Характеристики антикорозійної рідини Dinitrol ML [141]

Параметр	Значення
Густина при 23 °С	860 кг/м ²
В'язкість при 23 °С	60 с
Рекомендована товщина плівки	10 мкм
Час висихання	1 година
Стабільність при низьких температурах	до -40 °С
Влив на лакофарбове покриття	не впливає
Стійкість до соляного туману	більше 96 годин
Проникаюча здатність продукту	більше 70 мм

Як показують характеристики (табл. 5.3) Dinitrol ML (Mittel) забезпечує антикорозійну стійкість покриття в середовищі соляного туману більше 96 годин, при рекомендованій товщині 10 мкм.

Враховуючи вищевказані переваги доцільно застосовувати антикорозійну рідину Dinitrol ML.

Для нанесення захисного антикорозійного покриття у закритих порожнинах застосовуються спеціальні апарати високого тиску. Як показує практика, максимальна ефективність обробки буде при безповітряному розпилюванні з тиском понад 40 кгс/см².

Для перевірки стану закритих порожнин доцільно використовувати бороскоп (інтерскоп). Бороскоп – це портативна відеокамера на довгому, гнучкому щупі з підсвічуванням. Цей прилад дозволяє виводити зображення або на екран самого приладу, або на монітор персонального комп'ютера чи мобільного телефону. При виявленні корозійних пошкоджень та необхідності поновлення антикорозійного покриття виникає потреба у проведенні антикорозійної обробки. При наявності бруду, залишків корозійних відкладень, закриті порожнини необхідно промити миючим апаратом високого тиску (наприклад Kärcher тощо).

Незважаючи на те, що антикорозійна рідина забезпечує виштовхування вологи із порожнин/щілин, доцільно просушити автобус після мийки. Ефективне сушіння здійснюється тепловими пушками потужністю 25 кВт із потоком повітря до 3000 л/хв. Після ретельного просушування здійснюється обробка закритих порожнин за допомогою спеціального обладнання.

При експлуатації автобусів неминуче зношування антикорозійного покриття днища [142]. Такі пошкодження виникають при русі по дорогах низької якості, під дією продуктів зношування дорожнього покриття, піску, дорожнього бруду, каміння. Негативний вплив на антикорозійне покриття днища має експлуатація в холодну пору року, особливо при різких перепадах температури. Соляно-пісчані суміші проти обмерзання доріг також активно зношують антикорозійне покриття. При такій експлуатації з-під коліс автобуса відбувається бомбардування соляно-пісчаними сумішами в перемішку з іншим брудом колісних арок, днища, боковин та інших елементів облицювання кузова.

Тому важливо під час щоденного огляду контролювати цілісність захисту колісних арок та бризковиків. При виявленні таких недоліків у найкоротший термін їх усувати.

Повноцінний доступ до днища відкривається при піднятті автобуса на спеціальному підйомнику. Виявивши пошкоджені місця АЗ днища автобуса, проводиться очищення від іржі, знежирення, покриття перетворювачем іржі (з

дотриманням технології нанесення), покриття антикорозійним ґрунтом, а потім покриття мастикою. Всі шари покриття просушуються відповідно до їх умов нанесення. При значних площах пошкодження днища доцільним буде використання піскоструминних апаратів для видалення старого покриття та іржі. У такому випадку доцільним буде покриття мастикою всіх труб днища.

Для обробки днища антикорозійними матеріалами використовуються установки високого тиску з безповітряним розпилюванням із тиском 250–300 кгс/см². Такий тиск дозволяє ефективно розпилювати в'язку мастику.

5.4 Висновки до розділу 5

1. На сьогодні стало можливим забезпечувати рівномірність кузова при проектуванні застосуванням методу кінцевих елементів із використанням сучасних засобів автоматизованого проектування. При чому стало можливим зменшення металоємності автобуса без послаблення міцності каркасу кузова. Також виникла потреба в закладенні на стадії проектування належного ресурсу кузова автобуса, на який може вплинути економія матеріалу, з якого виготовляється каркас кузова. Тому на стадії проектування, проводячи розрахунок довговічності кузова автобуса з використанням сучасних прикладних програм (зокрема Matlab Simulink), стає можливим впливати на довговічність кузова змінюючи матеріали, їх перерізи та технології нанесення антикорозійного захисту.

2. Запропоновано три можливих варіанти вдосконалення технологій виготовлення кузовів автобусів в аспекті корозії і довговічності, із використанням сучасних прогресивних матеріалів. Більшість запропонованих матеріалів раніше не використовувались у автомобілебудуванні. Всі три варіанти передбачають попереднє покриття каркасу кузова високоадгезійним антикорозійним ґрунтом Helios 2K E-ZP товщиною 65–80 мкм перед приклеюванням або приварюванням облицювання. При першому варіанті приварюються бічні панелі з двостороннім покриттям цинку, а у місцях зварювання КК покривається струмопровідним ґрунтом Kotto PVB товщиною

20 мкм. Такий варіант забезпечить раціональну довговічність шкільних автобусів. Другий варіант більш досконалий та ефективно захищатиме кузов міських автобуса від корозії. На відміну від першого, тут вже приклеюються бічні панелі клеєм Sicaflex – 265 з попереднім нанесенням Sica Aktivator-100, а також приклеюються всі нерухомі стекла вікон. Третій варіант забезпечить найбільшу довговічність кузова автобуса (до двадцяти років), оскільки приклеюються бічні панелі з полімерного матеріалу Алюкобонд. Перехід на нові клеєві технології облицювання кузова з композитних корозійностійких матеріалів взамін сталевих листів дозволяє у 2,5–3 рази скоротити сумарну протяжність зварних швів. Скорочення кількості зварних швів зменшує кількість локальних основ появи корозії та погіршення фізико-механічних характеристик конструкції кузова. Таке рішення додатково підвищує корозійну стійкість кузова автобуса.

3. Проведено випробування клеючих сумішей з поверхнями приклеювання щодо їх адгезійних властивостей, для подальшого впровадження у виробництво, з умови надійності та довговічності в процесі старіння. На основі результатів досліджень було впроваджено у виробництво клеєві суміші Sicaflex для приклеювання облицювання у поєднанні з ґрунтами марки Helios при покритті сталевих труб каркасу кузова автобуса. Перед випробуванням зразків на розрив обов'язковою умовою було проведення старіння зразків згідно стандарту CQP – 034 у поєднанні із ISO 11997-1:2017, що відображає умови реальної експлуатації автобусів. Найкращі результати (когезійний розрив, більше 95%) показали клеї: Sicaflex – 252, Sicaflex – 263, Sicaflex – 265 при попередньому нанесенні на поверхні приклеювання Sica Aktivator-100. Встановлено, що перед нанесенням клею не потрібно матеріали покривати Primer (речовина, що повинна ще покращити адгезію та підвищує вартість технології). Додаткове нанесення Primer 206 G+P призводить до 10% відшарування праймеру після зберігання у воді та зниження когезійного розриву до 75%.

4. Для підвищення довговічності кузова автобуса в процесі експлуатації потрібно кузов підтримувати в чистоті, здійснювати постійний контроль лакофарбового покриття та антикорозійного покриття днища. Для забезпечення нормальної вентиляції каркасу кузова здійснювати постійний контроль дренажних отворів. При пошкодженні покриттів потрібно негайно усувати дефекти для унеможливлення розповсюдження корозії. Періодично (один раз у два роки) поновлювати антикорозійне покриття закритих порожнин каркасу кузова. Всі роботи по відновленню лакофарбового покриття потрібно проводити із дотриманням заводських технологій нанесення захисних покриттів.

РОЗДІЛ 6

ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕРМІНІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ (ДОВГОВІЧНОСТІ) АВТОБУСІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ УКРАЇНИ

6.1 Теоретичні основи формування раціонального терміну експлуатації з умов мінімізації загальних витрат

Згідно опитування жителів України, проведеного представниками корпорації «Богдан» показано, що більшість вважає, що термін експлуатації громадського транспорту в українських містах має відповідати європейським стандартам і не повинен перевищувати вісім років [143]. Інша частина опитуваних вважає, що термін експлуатації громадського транспорту має визначати сам виробник. При цьому відзначалось, що велике значення для термінів використання транспорту має стан доріг та належне технічне обслуговування [143].

Результати опитування підтверджуються також середньостатистичними сумарними витратами на поточний ремонт та ТО автобуса «Богдан» А092 залежно від терміну експлуатації та пробігу [78] (рис. 2.2). Такі статистичні дані показують, що після 8,5 років експлуатації відбувається стрімке зростання експлуатаційних витрат та при десятирічному терміні експлуатації автобус потребує безвідкладного відновлювального ремонту. Слід відзначити, що при інтенсивній експлуатації в містах-мільйонниках потреба у відновлювальному ремонті виникає вже через п'ять років експлуатації. При чому, як показує реальна експлуатація, відновлювального ремонту вистачає лише на 2–3 роки експлуатації. Згідно рекомендацій у розділі 5, термін експлуатації автобуса можна продовжити на 2–3 роки при належному догляді за автобусом та оновленні його антикорозійного захисту один раз на два роки. Відповідно і у містах-мільйонниках довговічність кузова автобуса може досягати восьми років. Враховуючи вище сказане можна обмежити терміни експлуатації

автобусів, що здійснюють перевезення пасажирів в Україні, не більше восьми років.

Однак на сьогодні в Федеративній Республіці Німеччина постало питання у збільшенні регламентовано допустимого терміну експлуатації автобусів громадського транспорту до двадцяти років. І такий варіант був би для нашої держави ідеальним. Таким чином постає питання – як можна досягнути двадцятирічного терміну експлуатації? Такі терміни будуть досяжними лише при належному обслуговуванні та антикорозійному захисті кузова автобуса. Тому такий ресурс (двадцять років) можна закласти ще на стадії проектування та виробництва і аж потім це повноцінно досягнути при належному технічному обслуговуванні, антикорозійному захисті та експлуатації.

На стадії проектування необхідно провести якісний розрахунок каркасу кузова на рівномірність із застосуванням сучасних прикладних програм (підрозділ 5.1). Згідно методу прогнозування ресурсу автобуса на стадії проектування (розділ 3) підібрати матеріал каркасу кузова та його переріз таким чином, щоб його довговічність складала не менше заздалегідь запропонованого (в даному випадку двадцять років). Потім потрібно застосувати технологію виробництва та антикорозійного захисту з використанням сучасних засобів обробки та полімерних матеріалів із застосуванням клеєвих сумішей згідно третього варіанту, запропонованого в підрозділі 5.2 (використання обшивки боковин кузова з полімерного матеріалу типу Алюкобонд та застосування клеючих сумішей Sicaflex, що дозволить зменшити сумарну протяжність зварних швів у 2,5–3 рази та, відповідно, зменшити осередки корозійних ушкоджень). Впровадивши такі технології, потрібно здійснювати жорсткий контроль технології виготовлення (не допускати для виробництва сталевий прокат із будь-якими проявами корозії, процес зварювання, склеювання, контролювати технологію підготовки поверхонь, температурні режими нанесення та сушіння покриттів тощо).

Поліпшити ресурс автобуса під час експлуатації стає можливим при застосуванні технології, запропонованої в підрозділі 5.3 при належному

технічному обслуговуванні та своєчасному періодичному (раз у два роки) оновленні антикорозійного захисту.

Таким чином можна сформувати ресурс автобусів залежно від запропонованих варіантів.

Вісім років – ресурс для автобусів при класичних технологіях виготовлення без його формування на стадії проєктування при умові своєчасного оновлення антикорозійного захисту.

До двадцяти років – ресурс для автобусів, які виготовлені згідно прогресивних технологій та сучасних полімерних корозійностійких матеріалів, розрахунку-формуванні ресурсу на стадії проєктування, дотримання технологій виготовлення, належного технічного обслуговування, оновлення антикорозійного покриття та дотриманням правил перевезень пасажирів по дорогах, що відповідають державним нормам [85].

Також ще є одна із можливостей продовження ресурсу автобуса – це високоякісний відновлювальний ремонт у заводських умовах при дотриманні заводських технологій виготовлення. При такому відновлювальному ремонті замінюються всі елементи каркасу кузова нижче підвіконного бруса (за необхідності і вище), замінюється рама (за наявності і при необхідності), проводиться відновлення за сучасними технологіями (третій варіант підрозділу 5.2), замінюється повнокомплектний машинокомплект (при потребі). У такому випадку стає можливим присвоїти відремонтованому автобусу поточний рік випуску (такі ремонти проводить ВАТ «Укравтобуспром»).

6.2 Оцінка необхідних програм оновлення парку автобусів громадського транспорту

Під час оцінки необхідних програм оновлення парку автобусів громадського транспорту однією із важливих задач буде обстеження пасажиропотоку із використанням сучасних прогресивних методів [144], що дозволяє визначати ступінь завантаження автобусів та необхідність у використанні відповідного типажу автобусів і їх раціональної кількості на

маршруті. При цьому виникає необхідність у проведенні об'єктивного моніторингу технічного стану автобусів [145, 146], з використанням прогресивних методів та сучасних засобів.

Також при розробці програми оновлення парку автобусів громадського транспорту слід врахувати сьогоднішній рейтинг найпопулярніших автобусів на вітчизняному ринку (за результатами реєстрації у 2022 р.) [147] (рис. 6.1).

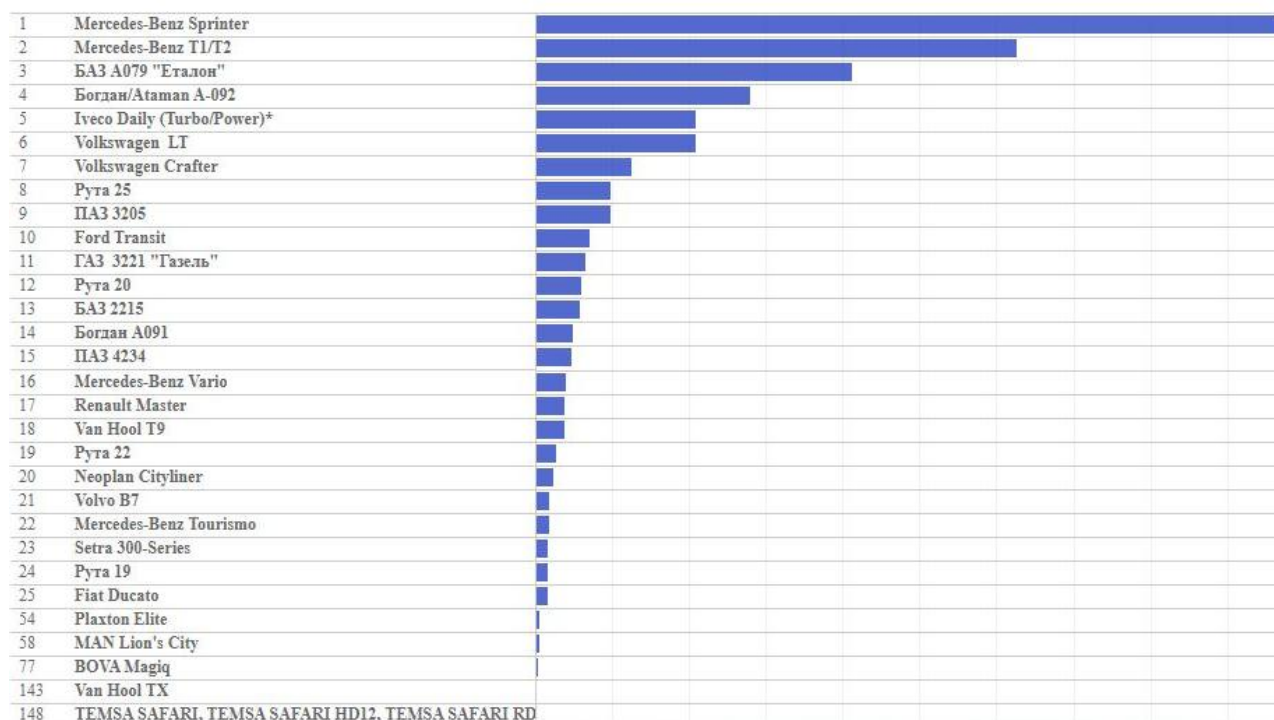


Рисунок 6.1 – Загальний рейтинг найпопулярніших автобусів на вітчизняному ринку у 2022 р. [147]

Найпопулярнішим автобусом на внутрішньому ринку у 2022 році став Mercedes-Benz Sprinter (970 одиниць). Більшість цих транспортних засобів були перероблені з вантажних автомобілів. Друге місце посіли автобуси сімейства Mercedes-Benz T1/T2 (626 одиниць). Ці моделі не випускалися з середини дев'яностих років, і більшість з них також були виготовлені як вантажні автомобілі. На третьому місці – один із найпопулярніших автобусів українського виробництва – БАЗ А079 «Еталон» (412 одиниць). Четверту позицію посів ще один популярний український автобус «Богдан»/«Атаман» А092 (280 одиниць) [147]. Слід відзначити, що автобуси Mercedes-Benz Sprinter

та Mercedes-Benz T1/T2 використовуються на міжміських маршрутах, тому лідерами при перевезенні пасажирів громадського транспорту у містах України є автобуси «Еталон» та «Атаман». При чому одним із вагоміших критеріїв вибору марок автобусів для оновлення автобусного парку в нашій державі є наявність заводів з виробництва автобусів «Еталон» (ПрАТ «Чернігівський автозавод») та «Атаман» АТ «Черкаський автобус». Крім цих заводів в Україні є ВІДКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ АВТОБУСО-ТРОЛЕЙБУСОБУДУВАННЯ (ВАТ «Укравтобуспром») у м. Львів, який є основним проєктним інститутом по проєктуванню, розробці та виготовленню автобусів. При чому ВАТ «Укравтобуспром» є розробником базових моделей автобусів: «Еталон» та «Богдан». Відповідно потужності виробництва дозволяють не тільки виготовляти автобуси марки «ТУР», а і проводити повноцінні відновлювальні ремонти автобусів «Еталон» із можливістю встановлення силових агрегатів з екологічними нормами Євро-5/Євро-6 та присвоювати поточний рік виробництва. Таким чином Україні є всі передумови для оновлення автобусного парку без залучення експортної продукції. Крім цього в Україні лідерами з реєстрації нових автобусів у 2022 р. є марка «Атаман» (колишній «Богдан») та марка «Еталон» [147] (рис. 6.2).

Перше місце серед нових автобусів у 2022 році посів український «Атаман» D093S2/S4 (139 шт.). На другому місці розмістилася інша модель українського бренду – БАЗ А081 «Еталон» (114 шт.), на третьому – «Атаман» А092Н6 (81 шт.) [147].

Таким чином основний відсоток автобусів, що можуть забезпечити оновлення автобусного парку України є автобусні заводи: АТ «Черкаський автобус» та ПрАТ «Чернігівський автозавод» при підтримці ВАТ «Укравтобуспром». Також не виключений розвиток інших автобусобудівних заводів України при впровадженні нових технічних рішень та технологій антикорозійного захисту, що дозволить підвищити конкурентоспроможність їхньої продукції.

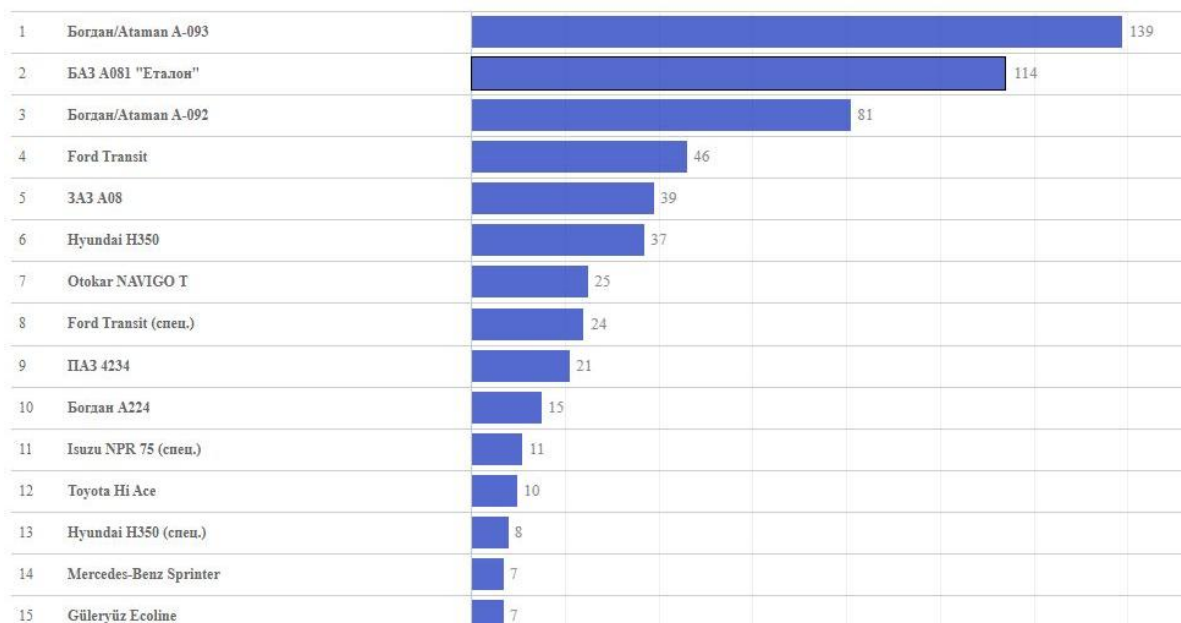


Рисунок 6.2 – Рейтинг найпопулярніших нових автобусів на вітчизняному ринку у 2022 р. [147]

Важливою інформацією також є кількість автобусів, що реєструються в кожній області України. На рис. 6.3. наведено статистичні дані зареєстрованих автобусів у 2022 р. [147]. З рис. 6.3 видно, що у 2022 році найбільше нових та вживаних автобусів зареєстрували в Київській області (647 одиниць), що склало 10,7% від загальної кількості. Ще 519 транспортних засобів цієї категорії (8,6%) – у Львівській області. Третє місце в рейтингу зайняло місто Київ (502 одиниці, 8,3%). На четвертому місці – Одеська область (484 одиниці, 8%), а замикає п'ятірку лідерів Дніпропетровська область (482 одиниці, 8%) [147]. Відповідно можна побачити, в яких регіонах максимально затребувані автобуси та які є потенційними покупцями даної продукції.

Не зважаючи на те, що в Україні спостерігається постійна реєстрація автобусів, відсоток нових автобусів суттєво менший від уживаних. Про це свідчить динаміка ринку автобусів за 2022 рік [147].

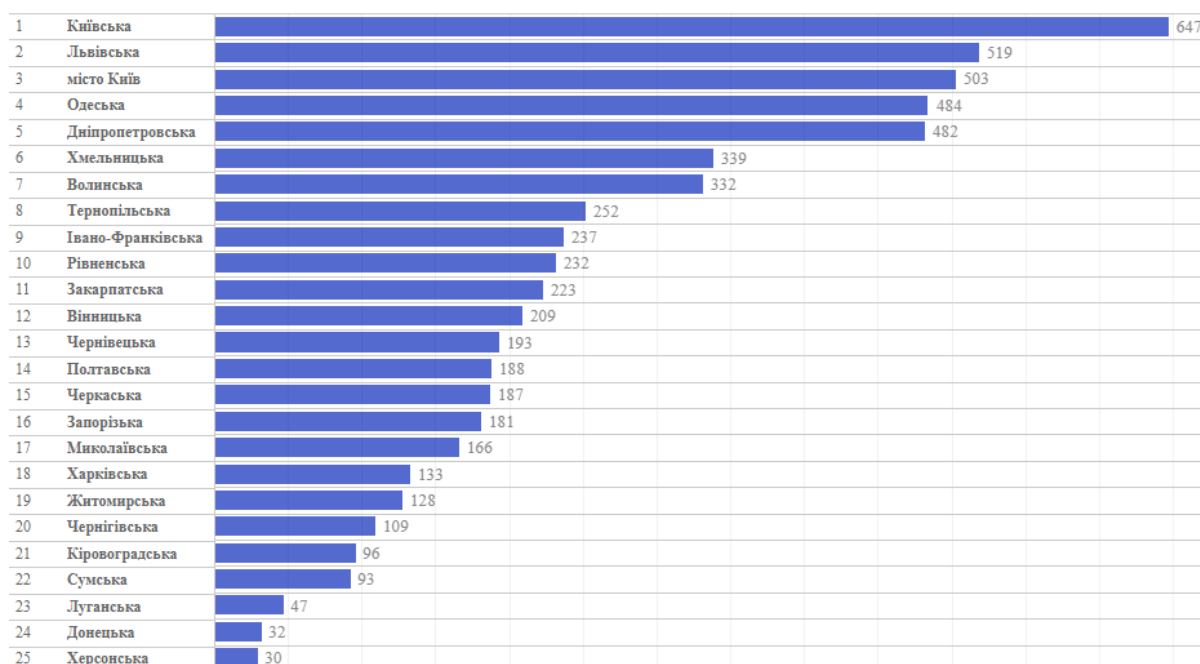


Рисунок 6.3 – Статистичні дані щодо реєстрації автобусів по областях та великих містах України у 2022 р. [147]

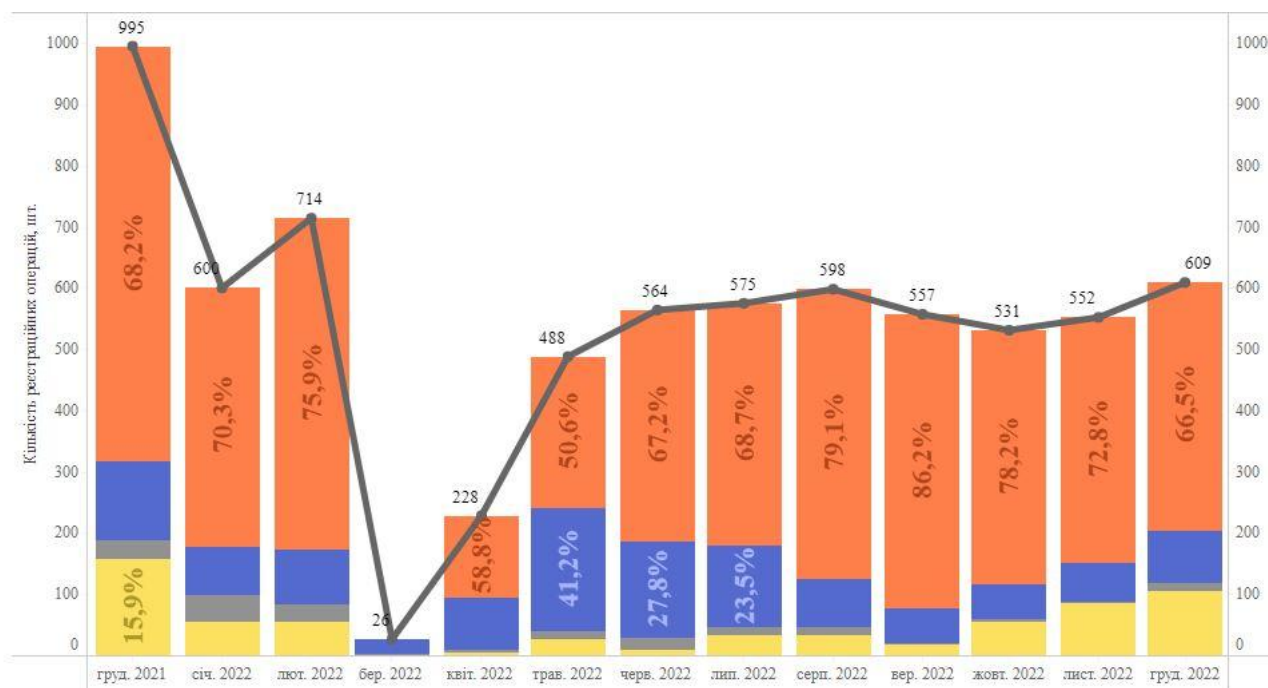


Рисунок 6.4 – Динаміка ринку автобусів за 2022 рік [147] (знизу вверх позначено кольором: жовтим – продаж нових автобусів українського виробництва; сірим – імпорт нових; синім – імпорт вживаних автобусів; червоним – внутрішні перепродажі автобусів)

У грудні 2022 р. в Україні закуплено 609 нових і вживаних автобусів. Це на 38,8% менше, ніж у грудні 2021 року та на 10,3% більше, ніж у листопаді 2022 року. Загалом протягом 2022 року в Україні закуплено 6000 автобусів. Це на 40,9% менше, ніж у 2021 році. Більшість їх (71,1%, 4,3 тис.) у 2022 році придбали на внутрішньому ринку. Ще 18,4% (1,1 тис.) привезли вживаними з-за кордону. Лише 10,5% (634) автобусів придбали новими. З цієї кількості більшість (475 одиниць) виготовили або переобладнали українські підприємства. Аналогічне співвідношення приблизно таке як і у попередні 5 років [147]. Це свідчить про те, що в Україні йде часткове оновлення автобусного парку. Така динаміка ринку автобусів вказує на те, що в Україні більша частина парку «оновлюється» автобусами, що були у використанні та після переобладнання і відновлювальних ремонтів. Це неминуче призводить до старіння парку автобусів громадського транспорту, що негативно впливає на безпечність перевезення пасажирів та спричиняє постійний ріст витрат на експлуатацію. Таким чином виникає необхідність у формуванні необхідних програм оновлення парку автобусів громадського транспорту та впровадження в реальну практику.

Відповідно до потреби у оновленні парку автобусів громадського транспорту ще в 2016 році було підписано проєкт «Міський громадський транспорт в Україні» [148]. Даний проєкт спрямований на реалізацію заходів з оновлення парку автобусів, трамваїв, тролейбусів, вагонів метрополітену, будівництва та реконструкції трамвайних і тролейбусних ліній, заміну тягових підстанцій, впровадження сучасних систем оплати проїзду та інформаційних систем за рахунок залучених кредитних коштів Європейського інвестиційного банку та Європейського банку реконструкції та розвитку. Загальна вартість проєкту становить орієнтовно 400 млн євро. Фінансування проєкту планувалось здійснити за рахунок залучених кредитних коштів Європейського інвестиційного банку під державні гарантії в обсязі – 200 млн євро, строком до двадцяти двох років із пільговим періодом до п'яти років. Джерелом співфінансування проєкту планувалось залучити кошти Європейського банку

реконструкції та розвитку та/або кошти місцевих бюджетів, кінцевих бенефіціарів.

Очікувані бенефіціари проєкту:

- КП «Білоцерківське тролейбусне управління»;
- КП Івано-Франківської міської ради «Електроавтотранс»;
- КП «Кременчуцьке тролейбусне управління»;
- КП міської ради «Луцьке підприємство електротранспорту»;
- КП Львівської міської ради «Львівелектротранс», «Львівавтодор» та «Автобусний парк №1»;
- КП «Київпастрас»;
- КП Одеської міської ради «Одесміськелектротранс»;
- Сумська міська рада;
- КП Тернопільської міської ради «Міськавтотранс»;
- КП Харківської міської ради «Харківський метрополітен»;
- КП Чернігівської міської ради «Чернігівське тролейбусне управління».

Метою даного проєкту було створити умови для надання населенню високоякісних послуг із перевезення автобусами, трамваями, тролейбусами та вагонами метрополітену, в тому числі з урахуванням потреб інвалідів з ураженнями органів зору, слуху, опорно-рухового апарату та інших маломобільних груп; забезпечити стабільне функціонування і подальший розвиток міського пасажирського транспорту; підвищити рівень технічного оснащення підприємств міського електричного транспорту та ефективності їх роботи; зберегти та примножити електротранспортну інфраструктуру та маршрутну мережу; забезпечити виконання на рівні 2015 року функції соціального перевізника міським електричним транспортом; не допустити збільшення шкідливих викидів та погіршення екологічного стану в містах унаслідок переорієнтації пасажиропотоків з екологічно чистого міського електричного транспорту на автотранспорт приватних підприємств, який дублює маршрути електротранспорту та призводить до збільшення транспортних заторів у містах; зберегти робочі місця на комунальних

підприємствах міського електротранспорту; стимулювати розвиток сучасних типів рухомого складу вітчизняного виробництва; не допустити оновлення рухомого складу за рахунок закордонної техніки, яка була у використанні.

Вищезгаданих цілей пропонувалось досягнути за результатами виконання окремих заходів залежно від потреб та фінансової спроможності кожного міста.

Відповідно сформульовано завдання проєкту:

- закупити новий сучасний рухомий склад;
- здійснити будівництво та реконструкцію трамвайних і тролейбусних ліній, модернізацію тягових підстанцій;
- впровадити сучасні системи оплати проїзду та інформаційні системи;
- зберегти та створити нові маршрути міського електричного транспорту;
- призупинити подальше скорочення та старіння рухомого складу міського електричного транспорту.

Відповідно до завдань проєкту розроблено орієнтовні загальні кількісні показники від його реалізації. Що стосується автобусів громадського транспорту, то під державні гарантії підлягало закупити 99 нових автобусів (м. Івано-Франківськ – 9 автобусів; м. Київ – 30 автобусів; м. Львів – 50 автобусів; м. Тернопіль – 10 автобусів) та під місцеві гарантії – 65 нових автобусів (м. Львів).

Відповідно в Україні з 2016 року почалось оновлення автобусного парку громадського транспорту, але в межах набагато більших, ніж заплановано даним проєктом. Закупівлі були ще в таких містах: Мукачеве (20 автобусів), Черкаси, Полтава, Харків, Суми, Кам'янське, Краматорськ, Дніпро та інших. На самому тільки АТ «Черкаський автобус» з 2017 р. по 2021 р. було в середньому в рік виготовлено і продано близько 300 автобусів (при потенційних можливостях виробництва 3000 автобусів щорічно), що значно перевищує заплановану кількість оновлення (за ці роки експортували тільки 40 автобусів).

Однак не зважаючи на розроблену програму та реальне оновлення автобусного парку України, станом на 2022 р. середній вік автобусів в Україні склав 17,8 років [149].

Відповідно раніше розроблена програма та реальне оновлення поза межами даної програми не забезпечили оновлення автобусів у повному об'ємі. Така низька ефективність оновлення пояснюється приділенням більшої уваги електротранспорту, у зв'язку з більшою його екологічністю та ефективністю. Однак в реальній практиці виявилось, що автобуси на сьогодні залишаються затребуваними на попередньому рівні, оскільки мають необмежену мобільність та здатність працювати в умовах енергетичної кризи.

6.3 Державне регулювання оновлення парку з умов безпеки руху і екології

6.3.1 Обґрунтування доцільності оновлення автобусного парку з умов безпеки руху і екології

Враховуючи суттєву чисельність автобусного парку України, він має вагомий вклад у забрудненні довкілля [150–152]. Крім того автобуси, терміни експлуатації яких виходять за межі 8–10 років, потребують відновлювального ремонту. На перший погляд вартість відновлювального ремонту автобуса «Богдан» А092 Євро II, III (приблизно 7500 доларів США) набагато вигідніша, ніж покупка нового автобуса «Атаман» А092Н6 Євро V (приблизно 68000 доларів США). Однак відремонтований автобус безперечно не новий та не відпрацює ресурс нового автобуса (приблизно 1 млн км). Це пов'язано з накопиченням осередків втомного руйнування в незамінених елементах каркасу кузова. В реальній експлуатації спостерігаються неодноразові втомні поломки деталей. Колінчастий вал може зруйнуватись на 700 тис. км пробігу. І не відомо, яка вірогідність того, що відновлювальний ремонт, враховуючи збільшення навантажень від нової циліндропоршневої групи, не спровокує поломку колінчастого валу з накопиченими втомними тріщинами. Виявити втомні тріщини можна на основі сучасного ультразвукового обладнання. Однак враховуючи недоступність (високу вартість) такі методи оцінки на автотранспортних підприємствах України в основному не застосовуються.

Складніша ситуація з кузовом. Під час ремонту кузова зазвичай вирізаються пошкоджені корозією деталі та уварюються аналогічні нові профілі прямокутного перерізу та листовий прокат. Але до уваги не беруться деталі із корозією внутрішніх порожнин при цілісності зовні. Наприклад: лонжерони каркасу основи, виконані з профілю 140×60×3,6 мм, за десять років експлуатації у деяких місцях кородують наскрізь. Ці місця, із запасом на сторону, замінюються. Але є такі частини лонжеронів (при товщині нового 3 мм), що вражені корозією на 1–2 мм. І це спричинить подальші капіталовкладення на виконання поточного ремонту. Крім того послаблені корозією місця та накопичення осередків втомного руйнування зменшують міцність та пасивну безпеку автобусних кузовів.

Як видно з табл. 6.1 екологічні норми Євро II чи Євро III суттєво поступаються екологічним нормам нових автобусів.

Таблиця 6.1 – Нормування викидів за європейськими стандартами [150, 153]

Стандарт	Рік уведення		Норми викидів, г/км			
	ЄС	Україна	CO	$C_mH_n+NO_x$	NO_x	C
Євро II	1995	2006	1,0	0,7	-	0,08
Євро III	1999	2013	0,64	0,56	0,5	0,05
Євро IV	2005	2014	0,5	0,3	0,25	0,025
Євро V	2009	2016	0,5	0,23	0,18	0,005
Євро VI	2015	2018	0,5	0,23	0,18	0,005

Нескладно підрахувати викиди одного автобуса при пробігу 1 млн км, порівнюючи автобуси з екологічними нормами Євро II та Євро V. Старий автобус «Богдан» А092 викине з відпрацьованими газами на 500 кг більше CO, на 470 кг більше ($C_mH_n+NO_x$) та на 75 кг більше твердих часток. Автобуси вітчизняного виробництва та виробництва країн СНД, котрі експлуатуються понад п'ять років однозначно відповідають екологічним нормам не вище Євро II. Тому враховуючи дані діаграми станом на 2013 рік (рис. 1.2) та

тенденцію старіння автобусного парку, можна стверджувати, що на сьогодні в Україні експлуатується не менше 48 тис. автобусів, екологічні норми яких не вище Євро II. І визначивши сумарні викиди можна сказати, що заміна на нові тільки цих 48 тис. автобусів дозволить суттєво поліпшити екологічну ситуацію країни. А саме – нові автобуси, що відповідають екологічному стандарту Євро V викинуть, як мінімум, на 24 000 тонн менше CO, на 22560 тонн менше ($C_mH_n+NO_x$) та на 3600 тонн менше твердих часток. Такі об'єми викидів можна зрівняти з викидами залізничним транспортом за 2011 рік: CO – 33578 т; ($C_mH_n+NO_x$) – 23231 т [154], що підтверджує вагомість оновлення автобусного парку.

Слід також відзначити, що Єврокомісія пропонує вводити жорсткі стандарти викидів CO_2 для міських автобусів [155]. Згідно з планом [155] – з 2030 року в Євросоюзі курсуватимуть тільки автобуси з нульовим рівнем викидів. При вступі України до Євросоюзу, неминучий перехід у нашій державі на автобуси з електроприводом. Тут [155] зазначено, що це допоможе скоротити викиди CO_2 в транспортному секторі. Оскільки вантажні автомобілі, міські автобуси та автобуси далекого прямування викидають понад 6% загальних шкідливих речовин на території країн Євросоюзу станом на 2023 р. Тому завдяки більш суворим стандартам це дозволить перейти до використання транспортних засобів з нульовим рівнем викидів та досягненню цілей Євросоюзу щодо поліпшення екологічного стану довкілля. Комісія пропонує вводити наступні етапи по зменшенню викидів CO_2 : скорочення викидів на 45% порівняно з 2030 роком, скорочення викидів на 65% порівняно з 2035 роком та скорочення викидів на 90% з 2040 року. Зазначається, що це принесе користь європейським перевізникам та користувачам, зменшивши витрати на паливо, а також забезпечить більш широке використання енергоефективних транспортних засобів. Крім того, поліпшиться екологічний стан міст, що має безпосередній вплив на здоров'я населення. Переглянуті стандарти дають чіткий сигнал для спрямування інвестицій промисловості Євросоюзу в інноваційні технології з нульовим рівнем викидів і розвиток інфраструктури

підзарядки і заправки. Запропоновані нові стандарти CO_2 відповідають збільшеним кліматичним амбіціям Євросоюзу, пакету Ready for 55 та Паризькій угоді. Перед уведенням стандартів у країнах Євросоюзу інвестиції спрямовують на розвиток транспортних засобів із нульовим рівнем викидів та розвиток відповідної інфраструктури. Комісія вже запропонувала Положення про інфраструктуру альтернативних видів палива, що передбачає розвиток необхідної зарядної інфраструктури для підтримки зеленої трансформації сектору важких транспортних засобів. Зокрема, Комісія запропонувала встановити пункти підзарядки та заправки через рівні проміжки на основних автомагістралях: кожні 60 км для зарядки електроенергії та кожні 150 км для водневої заправки [155].

На найближчі сім років (з 2023 року) можна передбачити спад цін на вживані автобуси закордонного виробництва та інтенсивне їх увезення до нашої держави. Це в деякій мірі може посприяти частковому тимчасовому оновленню автобусного парку України, однак через короткі терміни виникне потреба у наступному оновленні. Відповідно нововведення в країнах Євросоюзу матиме прямий вплив на зниження об'ємів виробництва на автобусобудівних заводах нашої держави. Але слід враховувати й те, що при вступі України до Євросоюзу, ввезені автобуси із двигунами внутрішнього згорання нам вже не будуть потрібними. Крім того, на відміну від країн Євросоюзу, у нас не буде ринку збуту вживаних автобусів із двигунами внутрішнього згорання.

Враховуючи тенденції оновлення автобусного парку в країнах Євросоюзу, в нашій державі потрібно передбачити швидкий перехід виробництва від автобусів із двигунами внутрішнього згорання на виробництво автобусів із нульовими викидами CO_2 . Над даним питанням вже досить давно працює ВАТ «Укравтобуспром», однак ще не виникла нагальна потреба у введенні в експлуатацію в Україні автобусів з електричними силовими установками.

Таким чином оновлення автобусного парку України потрібно проводити негайно та з урахуванням світових тенденцій автобусобудування. При цьому автобусобудівні підприємства повинні бути готовими до переходу на виготовлення електробусів швидким переналагодженням існуючого виробництва при розробці універсальних кузовів автобусів як під встановлення двигунів внутрішнього згорання, так і під застосування електроприводу. Важливим буде також прогнозування ресурсу кузовів та автобусів уцілому, що оснащуватимуться електроустановками.

Ввезення вживаних автобусів із країн Євросоюзу під час переходу на транспорт з нульовими викидами з одного боку може забезпечити дешевими автобусами іноземного виробництва Україну на певний період. Проте це може загальмувати виробництво вітчизняних автобусів та їх розробку згідно світових тенденцій. Тому при вступі до Євросоюзу виробництво автобусів в Україні не буде належним чином готове до забезпечення нашої держави автобусами з нульовими викидами. Крім того однією із умов вступу до Євросоюзу може бути підготовка інфраструктури до введення автобусів із нульовими викидами (пункти підзарядки та водневі заправки тощо).

6.3.2 Пропозиції щодо вдосконалення технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту

На основі досвіду експлуатуючих організацій нашої держави [156] (особливу увагу приділено таким містам: Київ, Харків, Львів, Мукачеве, Черкаси та інші), а також плідну співпрацю з АТ «Черкаський автобус» та ВАТ «Укравтобуспром» розроблено пропозиції щодо вдосконалення технічного контролю та допуску до експлуатації, враховуючи наступне [157]. Основним чинником щодо експлуатації автобусів громадського транспорту є безпека перевезення пасажирів, що регламентується правилами ЄЕК ООН № 66. На стадії проектування та виробництва нові автобуси проходять випробування і сертифікацію, що підтверджує виконання даних правил [48]. Однак у процесі експлуатації неминуче погіршуються фізико-механічні властивості матеріалів

каркасу кузова. Існуючий «Порядок проведення обов'язкового технічного контролю та обсягів перевірки технічного стану транспортних засобів» [158] передбачає використання тільки органолептичних засобів контролю. Тобто такий контроль передбачає наявність пошкоджень, які можна побачити візуально на рамі, кузові та інших несівних елементах (злами, тріщини, наскрізні корозійні пошкодження, тріщини зварних швів, відсутність кріпильних деталей з'єднань несівних елементів тощо). Однак, як показує досвід експлуатації, кузов підлягає поступовому корозійному зношуванню. Таким чином доцільним буде доопрацювання таблиці додатку 5 «Обсяги перевірки технічного стану транспортного засобу та коди оцінки його невідповідності» Порядку [158]. Також необхідно ввести чотири категорії придатності до експлуатації. Тому слід внести додатковий пункт (код 905.070) для контролю зменшення товщини стінок труб лонжеронів каркасу основи або рами (за наявності) при терміні експлуатації понад 5 років (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Вдосконалення таблиці в додатку 5 «Обсяги перевірки технічного стану транспортного засобу та коди оцінки його невідповідності» [158, 159]

Код	Об'єкт і предмет перевірки технічного стану, визначення невідповідності	Метод контролю	Оцінка невідповідності		
			нн	ін	нбн
905	Рама, кузов, інші несучі елементи:				
905.010	Зломи, тріщини, наскрізні корозійні пошкодження, тріщини зварних несучих швів або непридатність їх до виконання функцій за призначенням	органолептично			X

905.060	Відсутній болт або інші кріпильні деталі з'єднань несучих елементів, або вони не відповідають вимогам	органолептично			X
905.070	Контроль товщини стінок труб лонжеронів каркасу основи або рами (за наявності) при терміні експлуатації автобуса понад 5 років. Зменшення товщини стінок труб лонжеронів каркасу основи або рами більше, ніж на 15%.	засоби перевірки			X

Як видно із рис. 2.1, 2.21 *а*, 2.16 *б*, 2.26–2.28, візуальні методи контролю дозволяють зафіксувати тільки видимі ушкодження і не несуть ніякої інформації про стан закритих порожнин каркасу кузова. Вирізавши фрагмент каркасу кузова, можна побачити реальну товщину профілю труби (рис. 2.16 *б*).

З рис. 2.16 *б* видно, що повноцінний контроль буде проведений при вирізанні окремих фрагментів труб каркасу кузова. Однак такий метод нераціональний і потребує альтернативного методу контролю. Раціональним методом буде застосування ультразвукового товщиноміру металу. На рис. 6.5 зображено ультразвуковий товщиномір металу Walcom TM-881 (Китай). Ультразвуковий товщиномір металу дозволяє вимірювати товщину металу неруйнівним способом. Walcom TM-8816 – ультразвуковий товщиномір металів з вбудованим датчиком та можливістю встановлення відповідної швидкості звуку залежно від вимірюваного матеріалу. Призначений для вимірювання товщини виробів з металу та товщини матеріалів, наприклад: сталь, чавун, алюміній, червона мідь, латунь, цинк, кварцове скло, поліетилен. Діапазон

вимірювання складає від 1,0–200 мм, що дає змогу оцінити товщину труб каркасу кузова (від 2 до 4 мм залежно від профілю труб).



Рисунок 6.5 – Ультразвуковий товщиномір металу Walcom TM-881

Швидкість звуку варіюється в межах 500–9990 м/с. Точність приладу складає $\pm 0,5\%$ від виміряного значення. Робочий діапазон температур у межах 0–40 °С, при відносній вологості $< 85\%$.

Таким чином, запропонований метод контролю, із використанням ультразвукового товщиноміру металу, дозволить виконувати раціональний контроль автобусів із коректним вимірюванням товщини стінок труб каркасу кузова.

Вдосконалена методика дає можливість своєчасно виявити погіршення фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова [54].

В переліку обладнання, необхідного для проведення обов'язкового технічного контролю транспортних засобів (Додаток 2 Порядку [158]) додати

п. 14. «Ультразвуковий товщиномір металу». В п. 17. Порядку [158] максимальний розрахунковий оперативний час обов'язкового технічного контролю для автобусів необхідно збільшити з 65 до 80 хвилин, що обумовлюється більш ретельним контролем придатності автобуса. При наскрізних корозійних пошкодженнях труб лонжеронів каркасу основи або рами заборонити подальшу експлуатацію автобуса аналогічно (VU) [160].

Спільні заходи по контролю автобусів рамної чи несівної конструкції полягають в тому, що під час контролю кузов перевіряється на наявність тріщин, сколів, деформацій та різних дефектів покриття, а товщина несівних елементів труб каркасу перевіряється за допомогою товщиноміру металу [161]. Крім цього навіть своєчасний контроль параметрів керованих коліс впливає не тільки на керованість і стійкість автобуса, а і на навантаження на кузов автобуса [162]. Особливість контролю автобусів рамної конструкції полягає у тому, що рама перевіряється візуально на наявність будь-яких видів пошкоджень (тріщини, корозія, деформація, дефекти покриття). При чому повноцінний контроль кузова автобуса неможливий без використання сучасних методів імітаційного моделювання. Також особливу увагу слід звертати на кузов у місцях кріплення до рами, де можуть утворюватись тріщини та осередки втомного руйнування чи корозії. Щодо перевірки на відповідність пасивної безпеки Правилам № 66 ЄЕК ООН, методологія буде однаковою для автобусів рамної і несівної конструкції. Під час перевірки на відповідність Правилам № 66 ЄЕК ООН з використанням імітаційного моделювання [163] відмінність буде лише в фізико-механічних властивостях, геометричних розмірах та вагових характеристиках кузовів. Таким чином контроль автобусів рамної конструкції методом імітаційного моделювання здійснюється за тією самою методологією, що і контроль автобусів із несівними кузовами. Візуальний контроль відрізняється перевіркою рами та кріплення до неї кузова

Отже дані пропозиції по проведенню обов'язкового технічного контролю дозволять підвищити безпеку перевезень пасажирів та стимулюватимуть оновлення автобусного парку. Це, в свою чергу, підвищить попит на нові

автобуси (екологічні норми Євро-5, Євро-6) та відповідно поліпшить екологічну ситуацію в нашій державі. Також державне фінансування при закупівлі нових автобусів та часткова оплата проїзду громадянам міста дозволить прискорити процес оновлення автобусного парку громадського транспорту.

6.4 Висновки до розділу 6

1. Обґрунтовано раціональні терміни експлуатації автобусів громадського транспорту в Україні з умов мінімізації загальних витрат таким чином, що при належному обслуговуванні термін експлуатації автобуса до списання складає вісім років. При розрахунку-формуванні ресурсу кузова на стадії проектування можна досягнути терміну експлуатації автобуса до двадцяти років при виготовленні кузова згідно прогресивних технологій, з використанням сучасних полімерних корозійностійких матеріалів, дотриманням технологій виготовлення, належного технічного обслуговування, своєчасного оновлення антикорозійного покриття та дотриманням правил перевезень пасажирів по дорогах I–II категоріям згідно ДБН В.2.3-4:2015.

2. У нашій державі постійно оновлюється парк автобусів громадського транспорту на основі розроблених програм оновлення або за потребою самих перевізників, однак станом на 2022 р. середній вік автобусів в Україні склав 17,8 років. Це пояснюється недостатніми об'ємами оновлення автобусних парків та спрямуванням основних ресурсів на оновлення та облаштування екологічного електротранспорту. При цьому актуальність автобусів громадського транспорту залишається на попередньому рівні у зв'язку з їхньою мобільністю, автономністю та можливістю функціонування в умовах енергетичної кризи.

3. На найближчу перспективу, за умови вступу України до Євросоюзу, потрібно адаптувати виробництво автобусів для швидкого переходу від дизельних енергетичних установок до електричних, оскільки до 2030 року в країнах Євросоюзу планується повний перехід на автобуси з нульовим рівнем

викидів шкідливих речовин.

4. Розроблено рекомендації з оновлення ДСТУ 3649: 2010 шляхом введення загальноєвропейської практики вибракування автобусів, що дозволить виявляти недопустимі погіршення міцності каркасу внаслідок корозії та втомної міцності, що раніше не було можливим при застосуванні тільки візуальних методів контролю.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми, що полягає у опрацюванні методів забезпечення необхідного рівня характеристик міцності каркасів кузовів у цілому з умов впливу корозії і втомної міцності під час експлуатації ще на стадії проектування і виробництва автобусів та в опрацюванні методів технічного контролю відповідності кузова під час експлуатації нормативним вимогам пасивної безпеки (як умови допуску до подальшої експлуатації у системі громадського транспорту).

Отримані результати дають підстави сформулювати відповідні висновки та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

1. Встановлено, що автобуси при домінуючих на сьогодні технологіях проектування та виробництва при термінах експлуатації 5–10 років можуть не відповідати вимогам Правил ЄЕК ООН № 66, що пояснюється деградацією матеріалу елементів каркасу кузова та супроводжується зростаючим погіршенням пасивної безпеки перевезень і постійним зростанням експлуатаційних витрат.

2. Запропоновано метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з врахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та підтвердити безпеку пасажирських перевезень під певні умови та задані терміни експлуатації.

3. Запропоновано методику оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів у процесі експлуатації та відповідні пропозиції доповнення-зміни до ДСТУ 3649: 2010.

4. Опрацьовано практичні рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного

виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з урахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу.

5. Розроблено програмний комплекс для імітаційного моделювання-розрахунку зміни міцності каркасу кузова автобуса залежно від пробігу і часу експлуатації під різні типові умови – сфери використання автобусів.

6. Розроблено програмний комплекс для прогностичної оцінки впливу використання того чи іншого сортаменту прокату і марок сталі на зміну допустимого ресурсу кузова з умов дотримання відповідності нормативним вимогам пасивної безпеки.

7. Розроблено рекомендації щодо оновлення ДСТУ 3649: 2010 шляхом введення загальноєвропейської практики вибракування автобусів при недопустимому погіршенні міцності каркасу внаслідок корозії та втомної міцності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Транспортна стратегія України на період до 2020 року : станом на 20 жовт. 2010 р. / Кабінет Міністрів України. Офіц. вид. Київ : Парлам. вид-во, 2010. 38 с. (Бібліотека офіційних видань).
2. Майже 60% пасажирських автобусів в Україні смертельно небезпечні. URL: <http://tsn.ua/ukrayina/mayzhe-60-pasazhirskih-avtobusiv-v-ukrayini-smertelno-nebezpechni-289385.html> (дата звернення: 14.10.2022).
3. Uniform provisions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure : regulation No 66 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE), 13.03.2011. URL: [http://data.europa.eu/eli/reg/2011/66\(2\)/oj](http://data.europa.eu/eli/reg/2011/66(2)/oj) (Last accessed: 14.10.2022).
4. Scania Omni City Omni Link Body Workshop Manual. Body workshop, Scania CV AB 2004, Sweden1, 28.
5. Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States, FHWA-RD-01-156. URL: <http://www.fhwa.dot.gov/research/publications/> (Last accessed: 27.01.2021).
6. Kyröläinen, A., Vilpas, V., Hänninen, H. (2000). Use of Stainless Steels in Bus Coach Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 9(6), pp. 669. DOI: <http://dx.doi.org/10.1361/105994900770345548>.
7. Визначення втомної міцності поздовжніх балок автомобільних рам під час циклічних навантажень / Гудз Г. С., Глобчак М. В., Коцюмбас О. Й., Дацюк О. Р. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій* : матеріали 6-ої Міжнар. наук.-техн. конф., Львів, 25–26 жовт. 2018 р. Львів, 2018. С. 97–99.
8. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова на ресурсні характеристики автобуса в експлуатації. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2018. № 43. С. 31–35.
9. D'Souza, C., Paqueta, V., Lenkera, J., Steinfeldt, E., Bareria, P. (2012).

Low-floor bus design preferences of walking aid users during simulated boarding and alighting. *Transportation Access*, pp. 4951-4956. DOI: 10.3233/WOR-2012-0791-4951.

10. D'Souza, C., Zhu, X. (2014). Ambulation Aid Use and User Performance for Transit Vehicle Interior Design: proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 58(1), pp. 510-514. DOI: 10.1177/1541931214581106.

11. Menezes Salgado, R., Ohishi, T., Ballini, R. (2011). A Short-Term Bus Load Forecasting System. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, vol. 3, pp. 336-346. DOI: 10.1109/HIS.2010.5600075.

12. Besuden David, L. (2020). Scool Bus Corrosion. Automotive International, Inc. URL: <http://www.valugard.net/index.php/school-bus-corrosion-2/> (Last accessed: 27.01.2021).

13. Vertin, T. (2011). Protecting Your Vehicles from Corrosion. URL: <https://www.masstransitmag.com/home/article/10454360/protecting-your-vehicles-from-corrosion> (Last accessed: 27.01.2021).

14. Manual of for the Prevention of Corrosion on Vehicles and Equipment used by Transportation Agencies for Snow and Ice Control (2015). / Prepared by: Honarvar M., Dave N., Xianming Shi B. ; Published by: Minnesota Department of Transportation Research Services & Library 395 John Ireland Boulevard, MS 330 St. Paul, Minnesota 55155-1899.

15. Corrosion Protection – Proof That It Matters. Daimler Trucks North America LLC. 2018. URL: <https://thomasbuiltbuses.com/bus-advisor/articles/corrosion-protection-proof-that-it-matters/> (Last accessed: 27.01.2021).

16. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Аналіз досліджень з визначення термінів експлуатації автобусів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2016. № 5(128). С. 105–109.

17. Cagri, I., Izzet, C., Anil, Y., Namik, K., Karoseri, O. (2010). Fatigue Life

Prediction of a Bus Body Structure Using CAE Tools: conference, Fisita, 2010. *World Automotive Congress*. At: Budapest, Hungary, vol. 1, pp. 319-329.

18. Verros, G., Natsiavas, S. (2002). Ride dynamics of nonlinear vehicle models using component mode synthesis. In *ASME J. Vibr. Acoust.* 124, pp. 427-434.

19. Papalukopoulos, C., Natsiavas, S. (2007). Dynamics of large scale mechanical models using multi-level substructuring. In *ASME J. Comput. Nonlinear Dyn.* 2, pp. 40-51.

20. Yu, F., Guan, X., Zhang, J. (2002). Modeling and performance analysis for a city low-floor bus based on a non-linear rigid elastic coupling multibody model: SAE paper 2002-01-3904, 2000. In the Truck & Bus Meeting & Exhibition, Detroit, Michigan, 18–20 November 2002.

21. Krishnamoorthy, M., Sam Paul Albert, M. (2014). Durability Analysis of a Vehicle by Virtual Test Model (VTM). Ashok Leyland Ltd., Chennai, India. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/techbriefs/test-and-measurement/19542> (Last accessed: 29.01.2021).

22. White, M. (2010). Analyzing Durability. URL: <https://insider.altairhyperworks.com/analyzing-durability/> (Last accessed: 29.01.2021).

23. Suresh, B., Klinikowski, D., Gilmore, B. (1993). Comparison of Vehicle Durability Testing Methods: SAE Technical Paper. DOI: 10.4271/932967.

24. Proving ground durability simulations: degree project in mechanical engineering, second cycle, 30 credits. Stockholm, Sweden, 2019. URL: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1352854/FULLTEXT01.pdf> (Last accessed: 27.01.2021).

25. Bus and Coach Durability and Reliability Testing. (2021). URL: <https://www.millbrook.co.uk/services/vehicle-and-component/vehicle-durability-testing/bus-and-coach-durability-and-reliability-testing/> (Last accessed: 27.01.2021).

26. Xianghao, S., Shumin, F., Zhenning, L., Baoyu, H. (2016). Analysis of bus passenger comfort perception based on passenger load factor and in-vehicle time. *Springer Plus*, vol. 5(62), pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1694-7>.
27. Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K. (2019). Combining ITS and optimization in public transportation planning: state of the art and future research paths. *European Transport Research Review*, vol. 11(27), pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0365-5>.
28. Agostinacchio, M., Ciampa, D., Olita, S. (2014). The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab[®] approach. *European Transport Research Review*, vol. 6, pp. 267-275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8>.
29. Intini¹, P., Berloco¹, N., Cavalluzzi¹, G., Lord, D., Ranieri¹, V., Colonna, P. (2021). The variability of urban safety performance functions for different road elements: an Italian case study. *European Transport Research Review*, vol.13(30), pp. 1-14.
30. Hansson, L. (2011). The tactics behind public transport procurements: an integrated actor approach. *European Transport Research Review*, vol. 3, pp. 197-209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12544-011-0057-2>.
31. Sun¹, X.-Q., Cai¹, Y.-F., Yuan¹, C.-C., Wang, S.-H., Chen, L. (2018). Fuzzy Sliding Mode Control for the Vehicle Height and Leveling Adjustment System of an Electronic Air Suspension. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 25, pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0223-8>.
32. Nguyen, T., Lechner, B., Wong, Y.D. (2019). Response-based methods to measure road surface irregularity: a state-of-the-art review. *European Transport Research Review*, vol. 11(43), pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0380-6>.
33. Jin, Z., Li¹, J., Wang, H., Li, J., Huang, C. (2021). Rollover Prevention and Motion Planning for an Intelligent Heavy Truck. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 34(87), pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00605-z>.

34. Nemeth, J. (1990). The Role of Active and Passive Safety in Bus Engineering. SAE International in United States, Technical Paper 902273. DOI: <https://doi.org/10.4271/902273>.

35. Farahania, B.V., Ramosa, N.V., Moreiraa, P.M.G.P., Cunhab, R., Costab, A., Maiab, R., Rodrigues, R.M. (2022). Passive Safety Solutions on Transit Buses: experimental and Numerical Analyses. *Procedia Structural Integrity*, vol. 37, pp. 668-675. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.136>.

36. Голенко К. Е., Горбай О. З., Крайник Л. В. Оцінка тотожності моделювання відповідності автобусів правилу № 66 ЄЕК ООН та експериментальних випробувань. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. пр. Харків, 2010. № 1 : Автомобіле- та тракторобудування. С. 101–109. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/18327> (дата звернення: 14.10.2022).

37. Дослідження напружень в рамі автомобільного крана / Р. Зінько та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. № 1. С. 43–53.

38. Дослідження напружень в рамі автомобільного крана / Поляков А. П. та ін. *Вісник машинобудування та транспорту* : наук. журн. 2021. №1(13). С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-45-53>.

39. Дослідження напружень в рамі сміттєвоза з заднім завантаженням компактора / О. З. Горбай, Р. В. Зінько, Л. В. Крайник, А. П. Поляков. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. № 1. С. 49–54.

40. Yasmina, Boutar, Sami, Naïmi, Salah, Mezlini, Ricardo, J.C. Carbas, Lucas F.M. da Silvac , Moez Ben Sik Ali. (2021). Cyclic fatigue testing: assessment of polyurethane adhesive joints' durability for bus structures' aluminium assembly. *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 3, pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100053>.

41. Кепка, М., Кепка, М. Jr., Václavík, J., Chvojan, J. (2019). Fatigue life of a bus structure in normal operation and in accelerated testing on special tracks. *Procedia Structural Integrity*, vol. 17, pp. 44-50. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.007>.

42. Кепка, М., Кепка, М. Jr., Dzugan, J., Konopik, P. (2019). Practical notes for assessing the fatigue life of bodyworks of buses and trolleybuses. *Procedia Structural Integrity*, vol. 19, pp. 595-603. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.064>.

43. Кепка, М., Кепка, М. Jr. (2020). Accelerated fatigue testing on special tracks as new part of methodology for bus/trolleybus development. *Engineering Failure Analysis*, vol. 118, 104786. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104786>.

44. Акоюн Р. А. Гащук П. Н., Підгородецький Я. І. Деякі принципи оптимізації параметрів пневматичних підвісок автотранспортних засобів на основі сучасних уявлень про критерії плавності ходу : монографія. Ч. 3 : Пневматичне підресорювання транспортних засобів. Львів : Вища шк., 1984.

45. Акоюн Р. А. Спектральний аналіз напружень в елементах несучої системи автобуса ЛАЗ-698 при різних експлуатаційних параметрах. *Дослідження конструкцій та експлуатаційної надійності автобусів* : пр. ВКЕІавтобуспрому. Львів, 1976. С. 3–19.

46. Кельман І. І. Основи забезпечення системної ефективності експлуатаційних властивостей автобусів. Львів : Мета, 2001. 200 с.

47. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Методологія прогностичної оцінки ресурсної довговічності автобусів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті* : наук. журн. Луцьк, 2018. № 2(11). С. 117–121.

48. Горбай О. З., Голенко К. Е., Крайник Л. В. Міцність та пасивна безпека автобусних кузовів : монографія. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2013. 276 с.

49. Матейчик В. П., Володарець М. В., Курносенко Д. В. Особливості проблеми дистанційного оцінювання технічного стану складних систем на транспорті. *Вісник Національного транспортного університету. Сер. Технічні науки*. 2018. № 42. С. 79–90.

50. Gritsuk, I., Volkov, V., Mateichyk, V., Grytsuk, Y. et al., "Information Model of V2I System of the Vehicle Technical Condition Remote Monitoring and Control in Operation Conditions," SAE Technical Paper 2018-01-0024, 2018.

51. Пороховський Ю. В., Кіндрацький Б. І. Міцність і довговічність кільцевих зварних з'єднань оболонкових елементів машинобудівних конструкцій : монографія. Львів : ДВЦ НТШ, 2019. 158 с.

52. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин: підручник. Київ : Либідь, 2003. 424 с.

53. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Існуючі дослідження по визначенню термінів експлуатації автобусів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця, 2016. С. 88–92.

54. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Оцінка зміни фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса в процесі експлуатації. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2017. № 1(5). С. 47–52.

55. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Структура парку автобусів громадського транспорту України та аналіз ситуації. *Наукові нотатки : міжвуз. зб.* Луцьк, 2016. № 55. С. 338–340.

56. Біліченко В. В., Романюк С. О. Інноваційні стратегії розвитку міського пасажирського транспорту у Вінниці. *Вісник Севастопольського національного університету ім. В. Даля*. 2012. № 6(177). С. 178–184.

57. Дмитрієв М. М., Мороз М. М. Удосконалення системи управління пасажирським транспортом загального користування м. Кременчук. *Вісник Севастопольського національного університету*. 2012. № 6(177). С. 114–118.

58. Пилипенко О. М., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Обґрунтування раціональної експлуатації та оновлення автобусного парку м. Черкаси. *Вісник ЧДТУ* : зб. наук. пр. у галузі техн. наук. Черкаси, 2016. № 1. С. 35–40.

59. Комплексний підхід до вирішення питання щодо інтеграції громадського транспорту та міського планування / Огій О. В., Рубан Д. П.,

Голубов О. С., Підгорний М. В. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. Харків, 2015. № 5/3(25). С. 51–54.

60. Рубан Д. П., Підгорний М. В., Рубан Г. Я. Застосування електронних систем обстеження пасажиропотоків на міських автобусних маршрутах. *Вестник ХНАДУ*. Харьков, 2016. № 74. С. 17–20.

61. Статистичний щорічник України за 2014 рік / [ред. Жук І. М]. Київ : Держ. служба стат. України, 2015. 586 с.

62. Автомобільна статистика України (стислий огляд) 2010. Київ : Держ. служба стат. України, 2010. 37 с.

63. Половина автобусів в Україні потребує оновлення. URL: <http://transport-journal.com/news/autotransport-i-dorogi/polovyna-avtobusov-v-ukraїne-trebuє-obnovlenuya/> (дата звернення: 14.10.2022).

64. Крайник Л. В., Редзюк А. М. Розвиток структури та типу автобусів громадського транспорту в Україні та ЄС. *Проблеми з транспортними потоками і напрям їх розв'язання* : тези доп. І Всеукр. наук.-практ. конф., Львів, 26-28 берез. 2015 р. Львів, 2015. С. 115–116.

65. Gebrauchtbusbewertung. *Omnibus Revue TÜV Bus-Report*, 2015. 8(124), 38 s.

66. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Структура комп'ютерного моделювання – оцінювання ресурсу кузова автобуса з умов втомної міцності та корозії. *13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові* : матеріали симпозіуму. Львів, 2017. С. 119–120.

67. Verband der TÜV e. V. *TÜV Bus-Report*, 2018. 9, 19 s.

68. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Аналіз тенденцій розвитку пасажирських автобусних перевезень України та країн СНД. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : тези доп.: матеріали 2-ї Всеукр. наук.-практ. конф. Львів, 2016. С. 105–108.

69. Рубан Д. П. Тенденції розвитку автобусобудування України. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту* : наук. - виробн. зб. / АДІ ДонНТУ. Горлівка, 2008. № 1(6). С. 144–149.

70. Богдан А-064 / А-091 / А-09201 / А-09202 / А-09211 / А-09212 / А-092КВ / А-92 Н / А-30141 /А-301.71 /А-301.72/ С-09211 / А-092 / А-0921. Дизельні двигуни: 4.4/4.6/4.8 л. Керівництво з ремонту та експлуатації : каталог деталей і складальних одиниць. Дніпро : Моноліт, 2009. 370 с. : іл., кольор. мікросхеми.

71. Dassault Systèmes Solid Works Corporation. 2020. URL: <https://www.solidworks.com/> (Last accessed: 10.03.2020).

72. Alawadhi, E.M. Finite Element Simulations Using ANSYS CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 408 p.

73. Math. Graphics. Programming. 2020. URL: <https://www.matlab.com/> (Last accessed: 10.03.2020).

74. Кіндрацький Б. І., Войтків С. В., Осмак О. А. Конструктивні особливості автобусів великого класу та симуляційні моделі їх руху у середовищі Simulink. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : тези доп. III Всеукр. наук.-практ. конф., Львів, 22-23 лют. 2018 р. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2018. С. 55–58.

75. Моделювання систем управління в Simulink : навч. посіб. / В. А. Богомолів та ін. Харків : ХНАДУ, 2018. 220 с.

76. Правила дорожнього руху. 2020. URL: <https://vodiy.ua/pdr/> (дата звернення: 10.03.2020).

77. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Витрати у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*. Львів, 2017. № 866. С. 162–165.

78. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Витрати у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів. *Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання* : II Всеукр. наук.-теорет. конф., 16–18 берез. 2017 р. : тези доп. Львів, 2017. С. 40–42.

79. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова на ресурсні

характеристики автобуса в експлуатації. *Новітні технології розвитку автомобільного транспорту* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., 16–19 жовт. 2018 р. Харків, 2018. С. 66–69.

80. Гудз Г. С., Борис М. М., Захара І. Я. Визначення взаємозв'язку дефектів кузова спеціального автобуса. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2015. Т. 70. С. 11–18.

81. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Причини виникнення несправностей під час гарантійного обслуговування автобусів громадського транспорту *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 жовт. 2017 р. Харків, 2017. С. 130–131.

82. Автобуси типу А-092. Настанова щодо експлуатування А092-0000010 НЕ. Черкаси : Черкас. автобус, 2017. 173 с.

83. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу корозії автобуса на фізичну міцність несівних елементів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали VI міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця, 2018. С. 157–167.

84. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Аналіз корозійних пошкоджень кузовів автобусів під час експлуатації. *Тези всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 11–15 трав. 2020 р.* Житомир : Житомир. політехніка, 2020. С. 74.

85. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Ч. I : Проектування. Ч. II : Будівництво / М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України. Київ : Укрархбудінформ, 2015. 104 с.

86. Рубан Д. П., Крайник М. В., Рубан Г. Я. Методологія оцінки безпечності експлуатації кузовів автобуса з умов корозії та втомної міцності. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем* : матеріали Всеукр. наук.-техн.

інтернет-конф., 28–29 листоп. 2019 р. / Нац. ун-т водного госп.-ва та природокористування. Рівне, 2019. С. 139–140.

87. Житенко О. В., Крайник Л. В. Динаміка коливань і компонування автовоза. Динаміка і міцність машин. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2007. № 588. С. 31–35.

88. Ruban, D., Kraunyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Metelap, V., Khotunov, V., Mykhaylyuta, S. (2023). Devising an approach to assessing the durability of bus body on a frame chassis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (122)), 32–39.

89. Рубан Д. П. Математична модель прогнозування довговічності кузовів автобусів та перевірка її на адекватність. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2020. № 3(150). С. 81–89.

90. Ruban, D., Kraunyk, L., Ruban, H., Sosyk, A., Shcherbyna, A., Dudarenko, O., Artyukh, A. (2021). Forecasting the durability of public transport bus bodies depending on operating conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 26–33.

91. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка ресурсу кузова автобуса залежно від стану автомобільних доріг. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 90-річчю кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-ту, 27–29 жовт. 2021 р. Харків, 2021. С. 269–272.

92. Горбай О. З., Крайник Л. В., Єсеновський Ю. К. Дослідження динамічного навантаження гідродинамічної трансмісії автобуса з урахуванням повздовжньо-кутових коливань кузова. *Праці ВКЕІавтобуспрому*. Львів, 1987. С. 29–40.

93. Рубан Д. П. Математична модель прогнозування довговічності кузовів автобусів. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів* : зб. наук. пр. Миколаїв ; Коблево, 2018. С. 54–56.

94. Трощенко В. Т., Сосновський Л. А. Опір металів і сплавів : довідник. Ч. 1. Київ : Наук. думка, 1987. 512 с.
95. ДСТУ 2442-94. Розрахунки та випробування на міцність. Механіка руйнування. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-07-01]. Київ, 1995. 17 с.
96. Фомичов П. А. Енергетичний метод розрахунку довговічності при випадковому навантаженні. Механічна втома металів, 25-28 верес. 2006 р., Тернопіль / відп. ред. В. Т. Трощенко. Тернопіль : Тернопіл. держ. техн. ун-т ім. Івана Пулюя, 2006. 536 с.
97. Рубан Д. П. , Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Прогнозування довговічності лонжеронів каркасу основи автобуса в проблемних місцях. *Технічна інженерія : наук. журн.* Житомир, 2020. № 2(86). С. 18–23.
98. Горбай О. З. Науково-прикладні основи формування пасивної безпеки і міцності автобусних кузовів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.02. Київ, 2015. 360 с.
99. Ruban, D., Крауник, L., Ruban, H., Hrubel, M., Duzhyi, R., & Babaryha, A. (2022). Development of technological principles of technical control of bus bodies during operation based on passive safety conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (120)), 91–100.
100. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Дослідження зміни структури матеріалу лонжеронів каркасу кузова автобуса в умовах експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті : наук. журн.* Луцьк, 2017. № 2(9). С. 139–143.
101. Оцінка пасивної безпеки кузова автобуса під час експлуатації. / Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я., Крайник М. В. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали ІХ міжнар. наук.-техн. інтернет-конф.* Вінниця, 2021. С. 229–231.
102. Рубан Д. П. Експрес оцінка відповідності кузова автобуса вимогам пасивної безпеки в експлуатації. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали Х міжнар. наук.-техн. інтернет-конф.* Вінниця, 2022. С. 256–258.

103. ISO 6892-1:2019. Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. URL: <https://www.iso.org/standard/78322.html> (Last accessed: 14.10.2022).

104. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Оцінка фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса залежно від терміну експлуатації. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали V міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця, 2017. С. 60–64.

105. Дослідження макро- та мікроструктури матеріалів за допомогою металографічного мікроскопа MMP-2P : лаб. практик. / Г. В. Канашевич, П. П. Дмитренко, М. В. Голуб, С. М. Мацепа. Черкаси : ЧДТУ, 2017. 62 с.

106. Ruban, D.P., Kraynyk, L.V. (2017). Estimation of the regulated term of exploitation of busses from terms of accordance to norms of passive safety as a result of corrosion and tireless durability of basket. *Systemy I Środki transportu samochodowego. Ser.: Transport – Rzeszów*, Mon. Nr. 10, pp. 95–100.

107. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Дослідження зміни структури матеріалу лонжеронів каркасу кузова автобуса в умовах експлуатації. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали X міжнар. наук.-практ. конф. Вінниця, 2017. С.151–153.

108. Рубан Д. П. Вимірювальний комплекс деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. Харків, 2020. № 17. С. 27–32.

109. Arduino. 2020. URL: <https://www.arduino.cc/> (Last accessed: 10.03.2020).

110. Bjarne Stroustrup. A Tour of C++ (C++ In-Depth Series) 2nd Edition , 2018. 256 p.

111. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Опір матеріалів» для студентів інженерно-технічних спеціальностей усіх форм навчання / Веретільник Т. І., Дифучін Ю. М., Мисник Л. Д., Смоляр А. М. Черкаси : ЧДТУ, 2012. 61 с.

112. G-IDSS. Global Isuzu Diagnostic System. Tokyo : Isuzu, 2016. 47 p.

113. Рубан Д. П. Дослідження зміни напружень в елементах каркасу кузова автобуса під час експлуатації. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2020. № 46. С. 27–32.

114. Голенко К. Е. Оцінка міцності кузовів автобусів Low-entry методами комп'ютерного моделювання. *8-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові* : тези доп. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2007. С. 147–148.

115. Голенко К. Е., Горбай О. З., Крайник Л. В. Комп'ютерне моделювання і аналіз напружено-деформованого стану каркаса кузова автобуса типу Low-entry. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2008. № 614 : Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. С. 63–68.

116. Голенко К. Е. Формування крайових умов аналізу поведінки каркаса кузова автобуса типу Low-entry в умовах Правил ЄЕК ООН № 66. *Науковий вісник НЛТУ України* : зб. наук.-техн. пр. Львів : НЛТУУ, 2008. Т. 18, № 10. С. 97–103.

117. Горбай О. З., Голенко К. Е., Дубянський О. В. Формування розрахункової моделі автобуса з напівнесівним і несівним типом кузова. *Наукові нотатки ЛНТУ*. Луцьк, 2012. № 37. С. 58–63.

118. Мельничук П. П. Параметри механіки руйнування для основних зон зварного з'єднання сталі 20К в кліматичному діапазоні температур. *Вісник ЖІТІ. Сер. Технічні науки*. 1995. Вип. 2. С. 38–41.

119. Мельничук П. П. Втомна тріщина в умовах випадкового навантаження. *Вісник ЖІТІ. Сер. Технічні науки*. 1996. Вип. 4. С. 165–180.

120. Кур'ята П. В., Мельничук П. П. Вплив перевантаження на ріст втомних тріщин. *Вісник ЖІТІ. Сер. Технічні науки*. 1997. № 6. С. 16–26.

121. Мельничук П. П. Перевантаження як ресурс підвищення надійності листових металоконструкцій. *Вісник ЖІТІ. Сер. Технічні науки*. 1997. № 6. С. 13–15.

122. Мельничук П. П. Ресурс експлуатації елементів конструкцій з втомною тріщиною при квазістаціонарному випадковому навантаженні. *Вісник ЖІТІ. Сер. Технічні науки*. 1997. Вип. 5. С. 158–164.

123. Голенко К. Е., Крайник Л. В. Особливості формування несівних структур каркаса автобуса типу Low-entry. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2008. № 58 : Автомобіле- та тракторобудування. С. 113–117.

124. ДСТУ UN/ECE R 107–01:2008. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження транспортних засобів категорій М2 та М3 стосовно їхньої загальної конструкції (Правила ЄЕК ООН № 107–01: 2004, SDT).

125. Рубан Д. П., Крайник Ю. Л., Дзьоба В. В. Нові технології у виробництві кузовів автобусів з умов корозії. *Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів* : матеріали Всеукр. наук.-практ. семінару, 22 трав. 2019 р. / Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2019. С. 33–34.

126. Kowarska, J. Korta, K. Kuczek, T. Uhl. (2014). Fully Equipped Dynamic Model of a Bus. *Shock and Vibration*, vol. 2014, Article ID 201952, 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/201952>.

127. Nandhakumara, S., Seenivasan, S., Mohammed Saalihc, A., Saifudheenc, M. (2021). Weight optimization and structural analysis of an electric bus chassis frame. *Materialstoday: proceedings*, vol. 37(2), pp. 1824-1827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.404>.

128. Saarimaa, V., Kaleva, A., Ismailov, A., Laihinen, T., Virtanen, M., Levänen, E., Väisänen, P. (2022). Corrosion product formation on zinc-coated steel in wet supercritical carbon dioxide. *Arabian Journal of Chemistry*, vol, 15, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103636>.

129. Calovi, M., Rossi, S., Deflorian, F., Dirè, S., Ceccato, R., Guo, X., Frankel, G.S. (2020). Effects of Graphene-Based Fillers on Cathodic Delamination and Abrasion Resistance of Cataphoretic Organic Coatings. *Advanced Hybrid*

Coatings and Thin Films for Surface Functionalization. 10, 602. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10060602>.

130. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Грищук О. К. Умови та заходи по підвищенню довговічності кузовів автобусів громадського транспорту під час експлуатації. *Вісник Національного транспортного університету. Сер. Технічні науки*. Київ, 2021. № 1(48). С. 293–301.

131. Технологічні засади забезпечення довговічності кузовів автобусів у процесі виробництва / Рубан Д. П., Крайник Л. В., Крайник Ю. Л., Дзьоба В. В. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2020. № 2(12). С. 106–111.

132. Blanca, M. Rosales, Rosa Vera, Oladis Troconis de Rincon, Alejandro Di Sarli, Jaime Alberto Rocha Valenzuela, Johan Tidblad. (2012). Atmospheric Corrosion. *International Journal of Corrosion*, vol. 2012, art. ID 174240, 3 p., 2012. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/174240>.

133. Riddle, C.L., Marlow, M.J., Bazydlo, M.J. (2000). Exterior body side cladding attachment for amotor vehicle and related method. МКР В60R 13/02. No. US006095594A: Pat. No. 6,095,594; declared: 21.06.1998; published: 01.08.2000, Bul. No. 9/119,802, 10.

134. Nelson, W.A. (1999). Plastic cladding and body molding parts. МКР В32В 1/04. No. US005925425A: Pat. No. 5,925,425; declared: 10.06.1992; published: 20.07.1999, Bul. No. 07/896,290, 10.

135. Hoar, T. P. Report of the Committee on Corrosion and Protection, London: HMSO, 1971.

136. Сахно В. П., Іванушко О. М. Вплив умов експлуатації та системи технічного обслуговування і ремонту на технічний стан автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету : наук.-техн. зб.* Київ : НТУ, 2017. Вип. 1(37). С. 363–372.

137. Holzworth, J., Thompson, R.F., Voegeholt, A.L. *Trans. Soc. Auto. Engrs.*, vol. 64, pp. 221 (1956).

138. Ruban, D., Kraunyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Burmistrov, S., Khotunov, V., Metelap, V. (2022). Development of bus body technologies in terms of

corrosion and durability. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (117)), 67–75.

139. CQP – 034 2014. URL: https://www.organoids.com/uploads/tx_bh/organoid_adhesion_test_sika_1407.pdf?mod=153184213 (Last accessed: 21.02.2022).

140. Bobovich, B.B., Brovak, G.V., Bunakov, B.M. et al. (1990). *Chimiki – avtolyubiteljam: spravochnik. Izd [Chemists – Car Drivers: reference book]*. Leningrad: Chimija, 1990. 320 p.

141. Dinitrol-Ukraine. 2020. URL: https://dinitrol-ua.com/ru/antikor/obrabotka_auto/ml/ (Last accessed: 14.04.2020).

142. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Особливості антикорозійного захисту кузовів автобусів під час експлуатації. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. та наук.-метод. конф., присвяч. 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з Дня народж. проф. А. Б. Гредескула, 20–21 жовт. 2016 р. Харків, 2016. С. 120–121.

143. Українці вимагають зменшити термін експлуатації громадського транспорту. URL: <https://prompolit.info/2018/07/04/ukrayintsi-vimagayut-zmenshiti-termin-ekspluatatsiyi-gromadskogo-transportu/> (дата звернення: 24.10.2022).

144. Рубан Д. П., Рубан Г. Я., Підгорний М. В. Застосування електронних систем обстеження пасажиропотоків на міських автобусних маршрутах. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів* : зб. наук. пр. Миколаїв, 2016. С. 98–102.

145. Сахно В. П., Савостін-Косяк Д. О. Форми організації моніторингу технічного стану транспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету* : наук.-техн. зб. Київ : НТУ, 2017. Вип. 1(37). С. 373–380.

146. Сахно В. П., Іванушко О. М. Експертний аналіз причин зміни технічного стану автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету* : наук.-техн. зб. Київ : НТУ, 2018. Вип. 1(40).

С. 274–284.

147. Ринок автобусів скоротився на 40%, але стабілізувався. Підсумки 2022 – Eauto. URL: <https://eauto.org.ua/news/249-rinok-avtobusiv-skorotivsya-na-40-prote-stabilizuvavsya-shche-vlitku-pidsumki-2022> (дата звернення: 24.10.2022).

148. Названо середній вік вантажних автомобілів і автобусів в Україні. URL: MMR – Motor Media Review (дата звернення: 24.10.2022).

149. Проект «Міський громадський транспорт в Україні» / М-во інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/news/27947.html> (дата звернення: 24.10.2022).

150. Рубан Д. П., Рубан Г. Я., Осадчий В. П. Обґрунтування доцільності оновлення автобусного парку України. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів: зб. наук. пр.* Миколаїв, 2017. С. 49–50.

151. Матейчик В. П. Наукові основи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.02 / Нац. транспорт. ун-т. Київ, 2004. 368 с.

152. Курбака Г. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Комплексний підхід при підвищенні екологічної безпеки автомобільного транспорту. *Розвиток наукових міжгалузевих досліджень.* : матеріали наук.-практ. конф., м. Вінниця, 26–27 листоп. 2021 р. Херсон : Молодий вчений, 2021. Ч. 2. С. 84–87.

153. Про затвердження Вимог до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, методів такої перевірки : наказ М-ва інфраструктури України від 26.11.2012 № 710. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z2169-12>. (дата звернення: 24.10.2022).

154. Вплив на довкілля. Автомобільний транспорт. URL: http://pidruchniki.com/70500/ekologiya/vpliv_dovkillya (дата звернення: 24.10.2022).

155. Єврокомісія пропонує вводити жорсткі стандарти викидів CO_2 для міських автобусів / Центр транспорт. стратегій. URL: cfts.org.ua (дата звернення: 24.10.2022).

156. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Вдосконалення системи технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. Харків, 2019. № 15. С. 94–99.

157. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я., Курбака Г. В. Державний технічний контроль з урахуванням загальноєвропейської практики вибракування автобусів. *Економіко-правова політика в умовах світової кризи: проблеми і шляхи подолання* : зб. тез доп. учасників міжнар. наук.-практ. конф., Черкаси, 25 листоп. 2021 р. Черкаси : Східноєвроп. ун-т ім. Рауфа Аблязова, 2021. С. 51–53.

158. Про затвердження Порядку проведення обов'язкового технічного контролю та обсягів перевірки технічного стану транспортних засобів, технічного опису та зразка протоколу перевірки технічного стану транспортного засобу : постанова від 30.01.2012 р. № 137 : (із змінами, внесеними згідно з постановами КМ № 485 від 23.09.2014, № 1138 від 23.12.2015, № 141 від 10.03.2017) / Кабінет Міністрів України. Офіц. вид. Київ : Парлам. вид-во, 2012. 37 с.

159. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Пропозиції щодо обов'язкового періодичного технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : матеріали 3-ї Всеукр. наук.-практ. конф. Львів, 2018. С. 3–5.

160. Commission directive 2010/48/EU of 5 July 2010 adapting to technical progress Directive 2009/40/EC of the European Parliament and of the Council on roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers (Text with EEA relevance). 2010.

161. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Особливості технічного контролю кузовів автобусів рамної конструкції. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф. Вінниця, 2021. С. 195–197.

162. Verbitsky V., Shcherbyna A., Artyukh O., Dudarenko O., Kuzmin V., Ruban D., Fasoliak A. (2023). Mathematical modeling of change of the steering wheel toe-in angles when the vehicle moves in a curved direction. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*, Issue 57, Volume 15, Number 4, 1–7.

163. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Дослідження зміни структури матеріалу лонжеронів каркасу кузова автобуса в умовах експлуатації. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали X міжнародної науково-практичної конференції*. Вінниця, 2017. С.151–153.

ДОДАТОК А
Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова правління
ВАТ «Український інститут
автобусо-тролейбусобудування»



Л.В. Крайник

2023 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

науково-практичної розробки в діяльності
ВАТ «Український інститут автобусо-тролейбусобудування»
з дисертаційної роботи Рубана Д.П. на тему: «Науково-прикладні основи
прогностичної оцінки та формування ресурсу кузовів автобусів»

При проведенні дослідно-конструкторських робіт у ВАТ «Український інститут автобусо-тролейбусобудування» та розробці технічної документації з можливістю формування ресурсу кузовів автобусів на стадії проектування використовуються наступні результати дисертаційної роботи Рубана Д.П.:

- метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з врахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та підтвердити безпеку пасажирських перевезень;
- рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу.
- кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова та, відповідно, безпечний ресурс відповідно до вимог Правил СЕК ООН № 66.

Заст. голови правління
з дослідно-конструкторських робіт

Т.Л. Крайник

Головний технолог

В.В. Дзьоба

ЗАТВЕРДЖУЮ



Голова правління

АТ «ЧЕРКАСЬКИЙ АВТОБУС»

В.Г. Раабе

» 04 2023 р.

АКТ

впровадження результатів докторської дисертації Рубана Д.П.
на тему: «Науково-прикладні основи прогностичної оцінки та
формування ресурсу кузовів автобусів»

Відділами головного конструктора та головного технолога АТ «ЧЕРКАСЬКИЙ АВТОБУС» при розробці технічної документації для можливості формування ресурсу кузовів автобусів на стадії проектування використовуються наступні результати дисертаційної роботи Рубана Д.П.:

- метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з врахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та підтвердити безпеку пасажирських перевезень;
- рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу;
- кількісна оцінка впливу типу і стану автодоріг для різних класів автобусів та формування втомної міцності каркасу кузова та, відповідно, безпечний ресурс відповідно до вимог нормативної бази (Правил ЄЕК ООН № 66).

Директор технічний
АТ «ЧЕРКАСЬКИЙ АВТОБУС»

В.С. Чанцов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління

ПрАТ «ІСУЗУ-АТАМАН УКРАЇНА»



Коваленко В.М.

29 2023 р.

Довідка

про впровадження результатів докторської дисертації Рубана Д.П. на тему: «Науково-прикладні основи прогностичної оцінки та формування ресурсу кузовів автобусів»

Під час виконання дисертаційної роботи Рубаном Д.П. визначено раціональні терміни експлуатації міських автобусів в Україні враховуючи ріст витрат перевізників на поточні ремонти і підтримання належного технічного стану автобусів та погіршення характеристик пасивної безпеки кузова автобуса внаслідок корозії і втомної міцності до недопустимого нормативно рівня.

В результаті опрацювання цих чинників встановлено, що оновлення автобусного парку доцільно проводити із меншими пробігами та меншими термінами експлуатації ніж це виконують автотранспортні підприємства.

За результатами виконання дисертаційної роботи Рубана Д.П. можна проводити раціональне оновлення автобусних парків, що дозволить зменшити експлуатаційні витрати на автотранспортних підприємствах та забезпечити пасивну безпеку автобусів на належному рівні. Такі пропозиції також дозволять покращити попит на нові автобуси марки «Атаман», що підвищить об'єми продажів автобусів провідним дилером України ПрАТ «ІСУЗУ-АТАМАН УКРАЇНА».

Заступник голови правління

ПрАТ «ІСУЗУ-АТАМАН УКРАЇНА»

A handwritten signature in blue ink, which appears to be 'Сергій Кучуков С.В.', written over a horizontal line.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. ректора Львівського
національного університету
природокористування
академік НААНУ



В.В. Снітинський

2023 р.

Акт

**впровадження в навчальний процес
дисертаційного дослідження Рубана Д.П. на тему:
«Науково-прикладні основи прогностичної оцінки
та формування ресурсу кузовів автобусів»**

Результати дисертаційного дослідження Рубана Дмитра Петровича на тему: «Науково-прикладні основи прогностичної оцінки та формування ресурсу кузовів автобусів» впроваджено на кафедрі автомобілів і тракторів Львівського національного університету природокористування при підготовці здобувачів освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт». При викладанні дисциплін: «Автомобілі», «Технічна, комп'ютерна та дистанційна діагностика автомобілів», «Випробування автомобілів», «Надійність машин і систем», а також під час курсового, дипломного проектування та науково-дослідної роботи використовуються наступні положення:

- рекомендації щодо проектування кузовів автобусів в аспекті конструкційних матеріалів та технологій кузовного виробництва у взаємозв'язку з певними умовами експлуатації і необхідним безпечним ресурсом кузова з врахуванням процесів корозії і втомної міцності каркасу;
- метод прогностичного розрахунку ресурсу кузова автобуса під час експлуатації з врахуванням умов руху та впливу корозії і втомної міцності з дотриманням нормативних вимог пасивної безпеки, що дозволяє ще на етапі проектування і формування технологій виробництва реалізувати відповідні конструкції та підтвердити безпеку пасажирських перевезень;
- методика оцінки відповідності конструкції кузова нормативним вимогам пасивної безпеки під час регулярних технічних контролів.

Декан факультету механіки,
енергетики та інформаційних
технологій ЛНУП, канд. техн. наук, професор

С.Й. Ковалишин

Завідувач кафедри автомобілів
і тракторів ЛНУП, канд. техн. наук, доцент

В.В. Шевчук

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «ПЕРЕСУВНА

МЕХАНІЗОВАНА КОЛОНА №92»

Заграничний М.П.

«03» квітня 2023 р.

**ДОВІДКА**

про впровадження результатів докторської дисертації
Рубана Дмитра Петровича на тему: «Науково-прикладні основи
прогностичної оцінки та формування ресурсу кузовів автобусів»

Під час виконання дисертаційної роботи Рубаном Д.П. обґрунтовано раціональні терміни експлуатації автобусів громадського транспорту в Україні із застосуванням комплексного системного аналізу таких визначальних чинників:

- ріст прямих витрат перевізників на поточні ремонти і підтримання належного технічного стану автобусів по мірі їхнього старіння;
- погіршення характеристик пасивної безпеки кузова автобуса, що законодавчо, нормативно регламентовані, внаслідок корозії і втмної міцності до недопустимого нормативно рівня.

Беручи до уваги запропоновані межі раціональних термінів експлуатації автобусів на ТОВ «ПЕРЕСУВНА МЕХАНІЗОВАНА КОЛОНА №92» прийнято до використання пропозиції щодо своєчасного та поступового оновлення рухомого складу для запобігання в подальшому непомірних витрат на експлуатацію та суттєвих капіталовкладень на відновлювальні ремонти. Впроваджено методологію підвищення довговічності кузовів автобусів під час експлуатації, у тому числі й технологію оновлення антикорозійного захисту з використанням сучасних прогресивних методів та засобів обробки.

Головний інженер

ТОВ «ПЕРЕСУВНА МЕХАНІЗОВАНА КОЛОНА №92»

М.В.Ніконець

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Б.1. Список публікацій здобувача за темою дисертації:

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Sosyk, A., Shcherbyna, A., Dudarenko, O., Artyukh, A. (2021). Forecasting the durability of public transport bus bodies depending on operating conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 26–33. Scopus.
2. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Burmistrov, S., Khotunov, V., Metelap, V. (2022). Development of bus body technologies in terms of corrosion and durability. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (117)), 67–75. Scopus.
3. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Hrubel, M., Duzhyi, R., & Babaryha, A. (2022). Development of technological principles of technical control of bus bodies during operation based on passive safety conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (120)), 91–100. Scopus.
4. Ruban, D., Kraynyk, L., Ruban, H., Zakharova, M., Metelap, V., Khotunov, V., Mykhaylyuta, S. (2023). Devising an approach to assessing the durability of bus body on a frame chassis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (122)), 32–39. Scopus.
5. Verbitsky V., Shcherbyna A., Artyukh O., Dudarenko O., Kuzmin V., Ruban D., Fasoliak A. (2023). Mathematical modeling of change of the steering wheel toe-in angles when the vehicle moves in a curved direction. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*, Issue 57, Volume 15, Number 4, 344–350. Scopus.

6. Комплексний підхід до вирішення питання щодо інтеграції громадського транспорту та міського планування / Огій О. В., Рубан Д. П., Голубов О. С., Підгорний М. В. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. Харків, 2015. № 5/3(25). С. 51–54.

7. Рубан Д. П., Підгорний М. В., Рубан Г. Я. Застосування електронних систем обстеження пасажиропотоків на міських автобусних маршрутах. *Вестник ХНАДУ*. Харьков, 2016. № 74. С. 17–20.

8. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Структура парку автобусів громадського транспорту України та аналіз ситуації. *Наукові нотатки : міжвуз. зб.* Луцьк, 2016. № 55. С. 338–340.

9. Пилипенко О. М., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Обґрунтування раціональної експлуатації та оновлення автобусного парку м. Черкаси. *Вісник ЧДТУ : зб. наук. пр. у галузі техн. наук*. Черкаси, 2016. № 1. С. 35–40.

10. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Аналіз досліджень з визначення термінів експлуатації автобусів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2016. № 5(128). С. 105–109.

11. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Оцінка зміни фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса в процесі експлуатації. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2017. № 1(5). С. 47–52.

12. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Витрати у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*. Львів, 2017. № 866. С. 162–165.

13. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Дослідження зміни структури матеріалу лонжеронів каркасу кузова автобуса в умовах експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті : наук. журн.* Луцьк, 2017. № 2(9). С. 139–143.

14. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Методологія прогностичної оцінки ресурсної довговічності автобусів. *Сучасні технології в*

машинобудуванні та транспорті : Науковий журнал. Луцьк, 2018. № 2(11). С. 117–121.

15. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова на ресурсні характеристики автобуса в експлуатації. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2018. № 43. С. 31–35.

16. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Вдосконалення системи технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. Харків, 2019. № 15. С. 94–99.

17. Рубан Д. П. Вимірювальний комплекс деформацій елементів каркасу кузова автобуса в експлуатаційних умовах. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. Харків, 2020. № 17. С. 27–32.

18. Рубан Д. П. Математична модель прогнозування довговічності кузовів автобусів та перевірка її на адекватність. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2020. № 3(150). С. 81–89.

19. Рубан Д. П. Дослідження зміни напружень в елементах каркасу кузова автобуса під час експлуатації. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2020. № 46. С. 27–32.

20. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Прогнозування довговічності лонжеронів каркасу основи автобуса в проблемних місцях. *Технічна інженерія : наук. журн.* Житомир, 2020. № 2(86). С. 18–23.

21. Технологічні засади забезпечення довговічності кузовів автобусів у процесі виробництва. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Крайник Ю. Л., Дзьоба В. В. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2020. № 2(12). С. 106–111.

22. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Грищук О. К. Умови та заходи по підвищенню довговічності кузовів автобусів громадського транспорту під час експлуатації. *Вісник Національного транспортного університету. Сер. Технічні науки. Науково-технічний збірник*. Київ, 2021. № 1 (48). С. 293–301.

23. Ruban, D.P., Kraynyk, L.V. (2017). Estimation of the regulated term of exploitation of busses from terms of accordance to norms of passive safety as a result of corrosion and tireless durability of basket. *Systemy I Środki transportu samochodowego. Ser.: Transport – Rzeszów*, Mon. Nr. 10, pp. 95–100.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Аналіз тенденцій розвитку пасажирських автобусних перевезень України та країн СНД. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : тези доп.: матеріали 2-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції. Львів, 2016. С. 105–108.

25. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Існуючі дослідження по визначенню термінів експлуатації автобусів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця, 2016. С. 88–92.

26. Рубан Д. П., Рубан Г. Я., Підгорний М. В. Застосування електронних систем обстеження пасажиропотоків на міських автобусних маршрутах. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів* : збірник наукових праць. Миколаїв, 2016. С. 98–102.

27. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Особливості антикорозійного захисту кузовів автобусів під час експлуатації. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. та наук.-метод. конф., присвяч. 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з Дня народж. проф. А. Б. Гредескула, 20–21 жовт. 2016 р. Харків, 2016. С. 120–121.

28. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Оцінка фізико-механічних властивостей елементів каркасу кузова автобуса залежно від терміну експлуатації. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали V міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця, 2017. С. 60–64.

29. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Витрати у взаємозв'язку з термінами експлуатації міських автобусів. *Проблеми з*

транспортними потоками і напрямки їх розв'язання : II Всеукраїнська науково-теоретична конференція, 16–18 берез. 2017 р. : тези доповідей. Львів, 2017. С. 40–42.

30. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Структура комп'ютерного моделювання – оцінювання ресурсу кузова автобуса з умов втомної міцності та корозії. *13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові* : матеріали симпозіуму. Львів, 2017. С. 119–120.

31. Рубан Д. П., Крайник Л. В. Дослідження зміни структури матеріалу лонжеронів каркасу кузова автобуса в умовах експлуатації. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали X міжнародної науково-практичної конференції. Вінниця, 2017. С.151–153.

32. Рубан Д. П., Рубан Г. Я., Осадчий В. П. Обґрунтування доцільності оновлення автобусного парку України. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів*: зб. наук. пр. Миколаїв, 2017. С. 49–50.

33. Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Причини виникнення несправностей під час гарантійного обслуговування автобусів громадського транспорту. *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 жовт. 2017 р. Харків, 2017. С. 130–131.

34. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу корозії автобуса на фізичну міцність несівних елементів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали VI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Вінниця, 2018. С. 157–167.

35. Крайник Л. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Пропозиції щодо обов'язкового періодичного технічного контролю та допуску до експлуатації автобусів громадського транспорту. *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні* : матеріали 3-ї Всеукр. наук.-практ. конф. Львів, 2018. С. 3–5.

36. Рубан Д. П. Математична модель прогнозування довговічності кузовів автобусів. *Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів* : збірник наукових праць. Миколаїв ; Коблево, 2018. С. 54–56.

37. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка впливу введення площадок низького входу «low-entry» в структуру несівного кузова на ресурсні характеристики автобуса в експлуатації. *Новітні технології розвитку автомобільного транспорту* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., 16–19 жовт. 2018 р. Харків, 2018. С. 66–69.

38. Рубан Д. П., Крайник Ю. Л., Дзьоба В. В. Нові технології у виробництві кузовів автобусів з умов корозії. *Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів* : матеріали Всеукр. наук.-практ. семінару, 22 трав. 2019 р. / Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2019. С. 33–34.

39. Рубан Д. П., Крайник М. В., Рубан Г. Я. Методологія оцінки безпечності експлуатації кузовів автобуса з умов корозії та втомної міцності. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем* : матеріали Всеукр. наук.-техн. інтернет-конф., 28–29 листоп. 2019 р. / Нац. ун-т водного госп.-ва та природокористування. Рівне, 2019. С. 139–140.

40. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Аналіз корозійних пошкоджень кузовів автобусів під час експлуатації. *Тези всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 11–15 трав. 2020 р.* Житомир : Житомир. політехніка, 2020. С. 74.

41. Оцінка пасивної безпеки кузова автобуса під час експлуатації / Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я., Крайник М. В. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали ІХ міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. Вінниця, 2021. С. 229–231.

42. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Особливості технічного контролю кузовів автобусів рамної конструкції. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф. Вінниця, 2021. С. 195–197.

43. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я. Оцінка ресурсу кузова автобуса залежно від стану автомобільних доріг. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців* : наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 90-річчю кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-ту, 27–29 жовт. 2021 р. Харків, 2021. С. 269–272.

44. Державний технічний контроль з урахуванням загальноєвропейської практики вибракування автобусів. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Рубан Г. Я., Курбака Г. В. *Економіко-правова політика в умовах світової кризи: проблеми і шляхи подолання* : зб. тез доп. учасників міжнар. наук.-практ. конф., Черкаси, 25 листоп. 2021 р. Черкаси : Східноєвроп. ун-т ім. Рауфа Аблязова, 2021. С. 51–53.

45. Рубан Д. П. Експрес оцінка відповідності кузова автобуса вимогам пасивної безпеки в експлуатації. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту* : матеріали X міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. Вінниця, 2022. С. 256–258.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

46. Курбака Г. В., Рубан Д. П., Рубан Г. Я. Комплексний підхід при підвищенні екологічної безпеки автомобільного транспорту. *Розвиток наукових міжгалузевих досліджень*. : матеріали наук.-практ. конф., м. Вінниця, 26–27 листоп. 2021 р. Херсон : Молодий вчений, 2021. Ч. 2. С. 84–87.

Б.2. Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні результати дисертації доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на: II, III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (м. Львів 2016, 2018 р.); IV міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 2016 р.); X, XIV міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 2017, 2021 рр.); V, VI міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 2017, 2018 рр.); IX, X міжнародній науково-технічній Інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 2021, 2022 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів» (м. Коблево, 2016, 2017, 2018 рр.); Міжнародній науково-практичній та науково-методичній конференції присвяченої 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з Дня народження професора А. Б. Гредескула «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців» (м. Харків, 20-21 жовтня 2016 р.); II всеукраїнській науково-теоретичній конференції «Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання» (м. Львів, 16–18 березня 2017 р.); 13-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» (м. Харків, 19–20 жовтня 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту» (м. Харків, 16–19 жовтня 2018 р.); Всеукраїнському науково-практичному семінарі «Забезпечення функціональної стабільності автомобілів та тракторів» (м. Харків, 22 травня 2019 р.); Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем» (м. Рівне 28-29 листопада

2019 р.); Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки (м. Житомир, 11–15 травня 2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції присвяченої 90-річчю кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула Харківського національного автомобільно-дорожнього університету «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців» (м. Харків, 27–29 жовтня 2021 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Економіко-правова політика в умовах світової кризи: проблеми і шляхи подолання» (м. Черкаси, 25 листопада 2021 р.); Науково-практичній конференції «Розвиток наукових міжгалузевих досліджень» (м. Вінниця, 26–27 листопада 2021 р.).