

Фомін О. В., Козинка О.С., Лопатюк С.П., Фурсина А. Д.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТИДІЇ НЕГАТИВНОМУ ВПЛИВУ НА СКЛАДОВІ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ЗАСТОСУВАННЯМ АНТИВІБРАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

В роботі було розглянуто та проаналізовані методи комп'ютерного моделювання для прогнозування та оптимізації ефективності антивібраційних покриттів у протидії негативному впливу вібрації на складові конструкції транспортних засобів. У роботі розглянуто підходи до розробки та вдосконалення методів комп'ютерного моделювання для прогнозування та оптимізації ефективності антивібраційних покриттів у транспортних конструкціях. Особливу увагу приділено моделюванню взаємодії еластомерних матеріалів з металевими основами під дією циклічних навантажень, що характерні для експлуатації автомобільної, залізничної та авіаційної техніки. Запропоновано числові моделі на основі методу скінченних елементів (FEM), що дозволяють враховувати складні фізико-механічні властивості матеріалів покриттів (нелінійна деформація, гістерезисні втрати, температурна залежність) і динаміку збудження у широкому діапазоні частот. Проведено серію віртуальних експериментів із варіацією геометричних параметрів покриття (товщина, площа покриття) з метою визначення їхнього впливу на вібропередачу та напружений стан конструкції. Результати моделювання показали, що оптимізація товщини і розташування покриття може зменшити пікові амплітуди коливань до 60% та збільшити втомну довговічність конструкції у 2–3 рази. Розуміння того, як конкретні матеріальні властивості впливають на ефективність демпфування, дозволяє оптимізувати вибір матеріалів і конструкцій для конкретних умов експлуатації. У даному дослідженні розглянуто вплив товщини гумового покриття на довговічність металевих конструкцій. Основна увага приділяється ролі покриття у зменшенні втомного руйнування, вібронезбезпечних навантажень, зносу та корозії. Гума, як демпфуючий та захисний матеріал, суттєво покращує експлуатаційні характеристики конструкцій за рахунок поглинання динамічних навантажень та ізоляції металу від агресивного середовища. На основі узагальнених експериментальних даних визначено, що оптимальна товщина гумового шару становить 4–6 мм. У цьому діапазоні спостерігається максимальне зменшення амплітуди вібрацій (до 60–70%), зниження зносу металу більш ніж у 5 разів, а також зростання втомної довговічності конструкції у 3–4 рази. При цьому надмірне збільшення товщини (>8 мм) може призвести до зниження жорсткості, виникнення повзучості або відшарування покриття. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструктивних рішень у машинобудуванні, транспорті, енергетиці та інших галузях, де важливі надійність і тривалий ресурс роботи металевих елементів під впливом динамічних і корозійних факторів. Розроблена методика є універсальним інструментом для інженерного аналізу та може бути інтегрована в процес проектування нових зразків транспортних засобів із підвищеною вібраційною надійністю. Антивібраційні покриття широко використовуються в машинобудуванні, авіації, будівництві для зниження впливу шкідливих вібрацій.

Ключові слова: транспорт, механіка, вагони, комп'ютерне моделювання, інженерна графіка, вібрація, захисні покриття.

Актуальність дослідження. В сучасному світі транспортні засоби відіграють ключову роль у забезпеченні мобільності та економічного розвитку. Проте їх експлуатація супроводжується низкою негативних факторів, серед яких значне місце посідають вібрації. Ці вібрації, що виникають внаслідок роботи двигунів, руху по нерівних поверхнях та аеродинамічних сил, можуть мати руйнівний вплив на складові конструкції транспортних засобів. Вони призводять до зносу деталей, появи тріщин, послаблення з'єднань та, як наслідок, зниження надійності та безпеки експлуатації.

Одним із ефективних способів боротьби з негативним впливом вібрацій є застосування антивібраційних покриттів. Ці матеріали, нанесені на поверхні конструкційних елементів, здатні поглинати та розсіювати енергію вібрацій, зменшуючи їх амплітуду та передачу на інші частини транспортного засобу. Однак, розробка та оптимізація таких покриттів є складним науково-технічним завданням, що вимагає глибокого розуміння фізичних процесів та застосування сучасних методів дослідження.

У цьому контексті проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт з комп'ютерного моделювання набуває особливої актуальності. Комп'ютерне моделювання дозволяє створювати віртуальні моделі транспортних засобів та їх окремих компонентів, враховуючи їх геометричні характеристики, матеріальні властивості та умови експлуатації. За допомогою спеціалізованих програмних комплексів можна імітувати виникнення та поширення вібрацій, а також досліджувати ефективність застосування різних типів антивібраційних покриттів.

Переваги комп'ютерного моделювання є очевидними. Воно дозволяє значно скоротити час та витрати на проведення експериментальних досліджень, оскільки віртуальні випробування можуть бути виконані значно швидше та дешевше, ніж натурні. Крім того, моделювання надає можливість досліджувати поведінку конструкцій в екстремальних умовах, які важко або неможливо відтворити в реальних експериментах. Це

дозволяє оптимізувати параметри антивібраційних покриттів, такі як їх товщина, щільність, еластичність та адгезійні властивості, для досягнення максимального ефекту при мінімальній вазі та вартості.

Результати комп'ютерного моделювання можуть бути використані для розробки нових, більш ефективних антивібраційних матеріалів та технологій їх нанесення. Вони також можуть слугувати основою для проектування транспортних засобів з покращеними віброізоляційними характеристиками, що сприятиме підвищенню їх надійності, довговічності, комфорту та безпеки. Таким чином, інвестиції в науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з комп'ютерного моделювання протидії вібраціям є стратегічно важливим кроком для розвитку транспортної галузі та підвищення якості життя суспільства. Актуальність цих досліджень зростатиме й надалі, оскільки вимоги до екологічності, безпеки та комфорту транспортних засобів постійно підвищуються.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики.

Стаття [1] присвячена дослідженням у галузі матеріалознавства та інженерії. Зважаючи на назву серії, тема статті може варіюватися від розробки нових матеріалів до вивчення їхніх властивостей та застосування. Робота представляє наукові результати, отримані авторами у цій галузі.

Публікація [2] досліджує поведінку термічно бар'єрних покриттів, нанесених методом повітряно-плазмового напилення на підкладки з нержавіючої сталі, під впливом термічних циклів. Автори вивчають стійкість та довговічність цих покриттів при багаторазових змінах температури. У роботі, ймовірно, представлені результати експериментальних досліджень, що оцінюють адгезію, мікроструктуру та фазові перетворення в покриттях після термічних циклів. Отримані дані є важливими для розуміння експлуатаційних характеристик термічно бар'єрних покриттів у високотемпературних застосуваннях. Дослідження сприяє покращенню надійності захисних покриттів.

У науковій роботі [3] представлено оцінку теплоізоляційних та антивібраційних властивостей модифікованих термозахисних покриттів на основі епоксидної смоли в умовах струменя плазми. Автори досліджують ефективність цих покриттів у захисті від високих температур та вібрацій, що імітують екстремальні умови експлуатації. У роботі, ймовірно, описано склад модифікованих епоксидних композицій та методи їхнього випробування в аеродинамічній трубі з дуговим нагрівом. Отримані результати можуть бути корисними для розробки покращених захисних покриттів для аерокосмічної та інших галузей. Дослідження спрямоване на створення матеріалів з комплексом захисних властивостей.

Наукове дослідження [4] розглядає розробку структури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для локомотивів та оцінку якості її функціонування. Автори пропонують концепцію системи, яка може допомагати машиністам приймати обґрунтовані рішення в різних експлуатаційних ситуаціях. У роботі, ймовірно, описано основні компоненти системи та алгоритми її роботи. Результати оцінки якості функціонування можуть свідчити про потенційні переваги впровадження таких систем для підвищення ефективності та безпеки залізничних перевезень. Дослідження є внеском у розвиток інтелектуальних транспортних систем.

У статті [5] представлено дослідження процесу виготовлення епоксидних покриттів, армованих пластівцями оксиду заліза та нанокремнеземом. Автори вивчають вплив додавання цих наповнювачів на властивості отриманих композиційних покриттів. У роботі, ймовірно, описано методи синтезу та нанесення покриттів, а також результати випробувань їхніх механічних, термічних або корозійних властивостей. Армування епоксидних смол може покращити їхні експлуатаційні характеристики для різних застосувань. Це дослідження сприяє розширенню можливостей використання композиційних матеріалів.

Стаття [6] присвячена теоретичному та практичному визначенню параметрів бортових емнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори досліджують можливість використання конденсаторів для рекуперації енергії гальмування та її подальшого використання. У роботі, ймовірно, представлені математичні моделі, експериментальні дослідження або їх комбінація для визначення оптимальних параметрів накопичувачів. Отримані результати можуть бути використані для проектування енергоефективних систем живлення для метрополітену. Дослідження сприяє розробці екологічно чистих та енергозберігаючих технологій у міському транспорті.

Науково-прикладна робота [7] досліджує властивості зношування при фретинг-корозії спільно осаджених покриттів MoS_2/Ti при підвищених температурах. Автори, ймовірно, вивчали вплив температури на зносостійкість та коефіцієнт тертя цих композитних покриттів. Результати дослідження можуть бути корисними для розробки зносостійких матеріалів для застосувань, що працюють в умовах високих температур та вібрацій. Робота сприяє розумінню поведінки твердих мастильних матеріалів у складних умовах експлуатації. Дослідження є актуальним для інженерних застосувань, де зношування є критичним фактором.

У статті [8] досліджується поведінка твердих мастильних покриттів на основі MoS_2 при торсійному фретинг-зношуванні. Автори вивчали вплив умов навантаження та кількості циклів на знос та коефіцієнт тертя цих покриттів. Результати експериментів, ймовірно, демонструють механізми зношування та ефективність MoS_2 як твердого мастильного матеріалу в умовах торсійних коливань. Робота є цінною для розуміння поведінки мастильних покриттів у специфічних умовах контактної взаємодії. Дослідження сприяє вибору оптимальних мастильних матеріалів для запобігання зношуванню.

Автори публікації [9] розглядають питання забезпечення екологічної безпеки бурових суден під час їхньої експлуатації в особливих екологічних регіонах Північної Європи. Автори аналізують потенційні екологічні ризики, пов'язані з діяльністю бурових суден, та пропонують шляхи їхнього зменшення. У роботі, ймовірно, досліджуються технології запобігання забрудненню, методи моніторингу екологічного стану та регуляторні аспекти. Стаття підкреслює важливість сталого розвитку та охорони навколишнього середовища при здійсненні

промислової діяльності у вразливих екосистемах. Дослідження сприяє розробці екологічно відповідальних технологій для морської промисловості.

В статті [10] автори досліджують зношування при ударному фретинг-контакту нанокompозитного покриття MoS₂/C з різним вмістом вуглецю при циклічній низькій кінетичній енергії. Автори вивчали вплив вмісту вуглецю на зносостійкість та механізми руйнування покриття під дією ударних навантажень. Результати дослідження, ймовірно, показують оптимальний вміст вуглецю для досягнення найкращих зносостійких властивостей. Робота є важливою для розробки захисних покриттів, що працюють в умовах ударних вібрацій. Дослідження розширює розуміння поведінки нанокompозитних матеріалів при фретинг-зношуванні.

У роботі [11] представлено огляд прогресу в галузі морських протиобростаючих покриттів. Автори аналізують сучасні тенденції у розробці та застосуванні покриттів, що запобігають прикріпленню морських організмів до суден. У роботі розглядаються різні типи біоцидних та нетоксичних протиобростаючих технологій, їхня ефективність та вплив на навколишнє середовище. Стаття підкреслює важливість розробки екологічно безпечних та ефективних рішень для боротьби з обростанням. Огляд є корисним для дослідників та розробників у галузі морських покриттів.

Стаття [12] досліджує створення подвійного функціонального покриття з низькою поверхневою енергією для захисту від корозії та обростання. Автори використовували зшитий полісилазановий прекерамічний прекурсор з додаванням фтору для формування такого покриття. У роботі, ймовірно, описано процес синтезу покриття, його фізико-хімічні властивості та результати випробувань на корозійну стійкість та протиобростаючу дію. Розробка багатофункціональних покриттів є перспективним напрямком для захисту матеріалів, що експлуатуються в агресивних середовищах. Дослідження сприяє створенню ефективних та довговічних захисних покриттів.

Наукове дослідження [13] є оглядом прогресу в галузі протиобростаючих покриттів з низькою поверхневою енергією для корпусів суден. Автори аналізують різні підходи до створення таких покриттів, які запобігають прикріпленню морських організмів завдяки своїм фізичним властивостям. У роботі розглядаються різні матеріали та технології, що використовуються для досягнення низької поверхневої енергії та їхня ефективність у запобіганні обростанню. Огляд висвітлює сучасні тенденції та майбутні напрямки досліджень у цій важливій для судноплавства галузі. Стаття є цінним джерелом інформації для розробників екологічно чистих протиобростаючих рішень.

В роботі [14] розглядаються нові тенденції у розвитку самополіруючих протиобростаючих покриттів для морського середовища. Автори аналізують сучасні технології, що дозволяють покриттям поступово руйнуватися, вивільняючи біоциди або створюючи непридатну для обростання поверхню. У роботі обговорюються переваги та недоліки різних самополіруючих механізмів, а також їхній вплив на екологію. Стаття є важливим оглядом для розуміння сучасних підходів до боротьби з обростанням суден. Дослідження спрямоване на створення ефективних та екологічно прийнятних протиобростаючих рішень.

Публікація [15] представляє напівактивну систему віброізоляції з адаптивним антивібраційним керуванням для підвищення ефективності. Автори розробили систему, яка поєднує пасивні елементи з активним керуванням для досягнення кращого придушення вібрацій у широкому діапазоні частот. У роботі, ймовірно, представлені теоретичні розробки, моделювання та/або експериментальні результати, що демонструють переваги запропонованої системи. Адаптивне керування дозволяє системі пристосовуватися до змінних умов експлуатації. Дослідження є важливим внеском у розвиток ефективних систем віброізоляції.

В статті [16] є оглядом методів аналізу вібрацій лопатей гвинтокрила. Автори розглядають різні підходи до моделювання та дослідження вібраційних характеристик лопатей, що є критично важливим для забезпечення безпеки та надійності вертольотів. У роботі аналізуються теоретичні, чисельні та експериментальні методи, що використовуються для вивчення власних частот, форм коливань та реакції лопатей на різні навантаження. Огляд є корисним ресурсом для інженерів та дослідників, які займаються розробкою та аналізом гвинтокрилої техніки. Стаття підкреслює складність та важливість вібраційного аналізу роторів.

У статті [17] досліджуються смугові характеристики нелінійного антивібраційного ізолятора для низькочастотних застосувань. Автори розробили ізолятор, який демонструє ефективне придушення вібрацій у певному діапазоні низьких частот завдяки своїй нелінійній поведінці. У роботі, ймовірно, представлені теоретичний аналіз, моделювання та/або експериментальні результати, що підтверджують ефективність розробленого ізолятора. Такі ізолятори є важливими для захисту чутливого обладнання від низькочастотних вібрацій. Дослідження сприяє розвитку передових систем віброізоляції для складних застосувань.

Вивчення літератури показало, що комп'ютерне моделювання протидії негативному впливу на конструкції транспортних засобів є важливим напрямком досліджень. Однак, аналіз наявних робіт виявив недостатню кількість досліджень, присвячених саме застосуванню антивібраційних покриттів у цьому контексті. Більшість існуючих моделей зосереджені на загальних аспектах динаміки конструкцій або на експериментальних дослідженнях властивостей матеріалів. Недостатньо уваги приділяється розробці та верифікації чисельних методів для прогнозування ефективності антивібраційних покриттів у складі складних транспортних систем. Отже, існує значна потреба у подальших дослідженнях, спрямованих на розробку адекватних моделей комп'ютерного моделювання для оптимізації застосування антивібраційних покриттів з метою підвищення надійності та довговічності транспортних засобів. Це відкриває перспективи для розробки нових підходів та інструментів у галузі інженерного аналізу та проектування.

Постановка проблеми

Вібрація є невід'ємною частиною функціонування будь-якого транспортного засобу. Її джерелами можуть бути двигун, трансмісія, нерівності дорожнього покриття, аеродинамічні сили та інші фактори. Ця вібрація, без належного контролю, здатна спричинити цілий спектр негативних наслідків для складових конструкцій транспортних засобів. Серед них – зниження довговічності матеріалів через втомні руйнування, послаблення з'єднань, виникнення тріщин та навіть повне руйнування окремих елементів.

Окрім структурних пошкоджень, вібрація негативно впливає на комфорт пасажирів та працездатність водія, створюючи акустичний шум та викликаючи фізичну втому. Це особливо актуально для громадського транспорту, вантажних автомобілів та спеціалізованої техніки, де тривалість перебування людей у вібруючому середовищі є значною. Таким чином, проблема боротьби з вібрацією в транспортних засобах є багатогранною та охоплює аспекти безпеки, надійності та ергономіки.

Одним з ефективних методів протидії негативному впливу вібрації є застосування антивібраційних покриттів. Ці матеріали, нанесені на поверхні конструкційних елементів, здатні поглинати та розсіювати енергію коливань, зменшуючи їх амплітуду та інтенсивність. Ефективність антивібраційних покриттів залежить від багатьох факторів, включаючи їхні фізико-механічні властивості, товщину шару, площу покриття та частотний спектр вібрації.

Процес експериментального дослідження ефективності антивібраційних покриттів є досить трудомістким та потребує значних часових і фінансових витрат. Він включає виготовлення зразків конструкцій, нанесення покриттів, встановлення датчиків вібрації та проведення серії випробувань у різних режимах експлуатації. Отримані експериментальні дані дозволяють оцінити демпфуючі властивості матеріалів та оптимізувати параметри їх застосування.

Однак, розвиток комп'ютерних технологій відкриває нові можливості для дослідження та проектування антивібраційних систем. Комп'ютерне моделювання дозволяє створювати віртуальні моделі транспортних засобів та їхніх складових, враховуючи геометричні параметри, властивості матеріалів та умови експлуатації. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення можна імітувати процеси вібрації, досліджувати їх поширення конструкцією та оцінювати вплив різних типів і параметрів антивібраційних покриттів.

Використання комп'ютерного моделювання має низку значних переваг порівняно з традиційними експериментальними методами. Воно дозволяє значно скоротити час та вартість досліджень, оскільки не потребує виготовлення фізичних прототипів та проведення натурних випробувань. Крім того, комп'ютерні моделі дають можливість досліджувати поведінку конструкцій у широкому діапазоні умов експлуатації, включаючи екстремальні режими, які складно або неможливо відтворити в лабораторних умовах.

Важливим аспектом комп'ютерного моделювання є вибір адекватних математичних моделей та методів розрахунку, які б точно описували фізичні процеси вібрації та демпфування. Необхідно враховувати складні властивості антивібраційних матеріалів, їхню залежність від частоти, температури та рівня деформації. Точність результатів моделювання безпосередньо залежить від якості вхідних даних та адекватності обраної моделі.

Таким чином, існує актуальна науково-технічна проблема, яка полягає у розробці та вдосконаленні методів комп'ютерного моделювання для ефективного протидії негативному впливу вібрації на складові конструкції транспортних засобів за допомогою застосування антивібраційних покриттів. Розв'язання цієї проблеми сприятиме підвищенню надійності та довговічності транспортних засобів, покращенню комфорту пасажирів та зниженню експлуатаційних витрат. Подальші дослідження в цій галузі є важливими для розвитку транспортного машинобудування та створення більш безпечних та ефективних транспортних систем.

Мета та задачі дослідження.

Мета наукового дослідження полягає у розробці та вдосконаленні методів комп'ютерного моделювання для прогнозування та оптимізації ефективності антивібраційних покриттів у протидії негативному впливу вібрацій на складові конструкції транспортних засобів. Це включає в себе детальне вивчення механізмів поглинання вібрацій різними типами покриттів та їхньої взаємодії з матеріалами конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд ключових задач. Першою задачею є аналіз існуючих методів комп'ютерного моделювання динамічної поведінки транспортних засобів та їхніх складових частин під впливом вібраційних навантажень. Другою задачею є розробка математичних моделей, що адекватно описують демпфуючі властивості антивібраційних покриттів залежно від їхніх фізико-механічних характеристик та умов експлуатації. Третьою задачею є створення комп'ютерних моделей конкретних вузлів та агрегатів транспортних засобів з урахуванням нанесених антивібраційних покриттів. Четвертою задачею є проведення серії чисельних експериментів для оцінки впливу різних параметрів покриттів (товщини, матеріалу, площі нанесення) на рівень вібрацій та довговічність конструкцій.

Виклад основного матеріалу.

1) Аналіз існуючих методів комп'ютерного моделювання динамічної поведінки транспортних засобів та їхніх складових частин під впливом вібраційних навантажень.

Антивібраційні покриття широко використовуються в машинобудуванні, авіації, будівництві для зниження впливу шкідливих вібрацій. Розуміння того, як конкретні матеріальні властивості впливають на ефективність демпфування, дозволяє оптимізувати вибір матеріалів і конструкцій для конкретних умов експлуатації.

Розглянемо математичну модель демпфуючих властивостей антивібраційного покриття на основі теорії в'язко-пружних середовищ, зокрема, моделі Кельвіна-Фойгта. Антивібраційне покриття розглядається як в'язко-пружне тіло, яке чинить опір коливанням завдяки поєднанню еластичності та в'язкості.

Ця модель складається з: пружного елемента (пружина) з модулем Юнга E , в'язкого елемента (демпфер) з коефіцієнтом в'язкості η . Ці елементи з'єднані паралельно.

Рівняння напруження. Сумарне напруження $\sigma(t)$ в моделі Кельвіна-Фойгта:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt},$$

де $\varepsilon(t)$ – деформація у часі;

E – модуль пружності (Па) ;

η – коефіцієнт внутрішнього тертя або в'язкості (Па·с).

Рівняння руху для маси з покриттям. Уявимо, що маємо систему маса–пружина–демпфер (аналог поверхні з антивібраційним покриттям):

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \eta \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t),$$

де m – маса, яка діє на покриття (наприклад, деталь);

η – в'язкість покриття;

$k = E \cdot A/L$ — жорсткість покриття (A — площа поперечного перерізу, L — товщина шару);

$x(t)$ – зміщення;

$F(t)$ – зовнішня сила (вібраційне навантаження).

Аналіз у частотній області. Якщо сила $F(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t)$, тоді можна проаналізувати амплітудно-частотну характеристику системи.

Після переходу в частотну область, отримуємо:

$$X(\omega) = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (\eta\omega)^2}}$$

Це дозволяє оцінити амплітуду зміщення в залежності від частоти збурення, в'язкості, маси та жорсткості. Розглянемо амплітудно-частотну характеристику антивібраційного покриття завдяки графіка (рис.1).

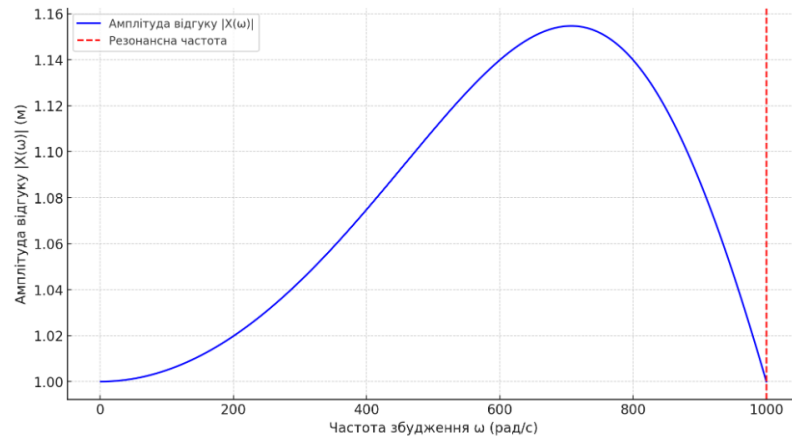


Рисунок 1 – Амплітудно-частотна характеристика системи з антивібраційним покриттям

На графіку зображено амплітудно-частотну характеристику системи з антивібраційним покриттям, змодельованої за допомогою моделі Кельвіна-Фойгта. Синя крива – амплітуда зміщення маси при різних частотах збурення. Червона пунктирна лінія – резонансна частота системи $\omega_0 = \sqrt{k/m}$.

З графіка можна зробити висноки: при низьких частотах система відносно м'яко реагує; поблизу резонансної частоти – різке зростання амплітуди (максимум); завдяки демпфуванню (в'язкість η), пікова амплітуда згладжується, що означає ефективне гасіння вібрацій.

Зробимо з цієї математичної моделі висновки: при зростанні η , система краще гасить височастотні коливання, модуль пружності E впливає на частоту резонансу, модель добре підходить для опису лінійного демпфування, але не враховує гістерезис (енергетичні втрати при розвантаженні).

Також розглянемо і проаналізуємо графіки, якщо змінимо параметри (наприклад, збільшити в'язкість чи товщину покриття) і подивитися, як це вплине. Дивимось на (рис. 2) вплив коефіцієнта в'язкості η та вплив товщини покриття L .

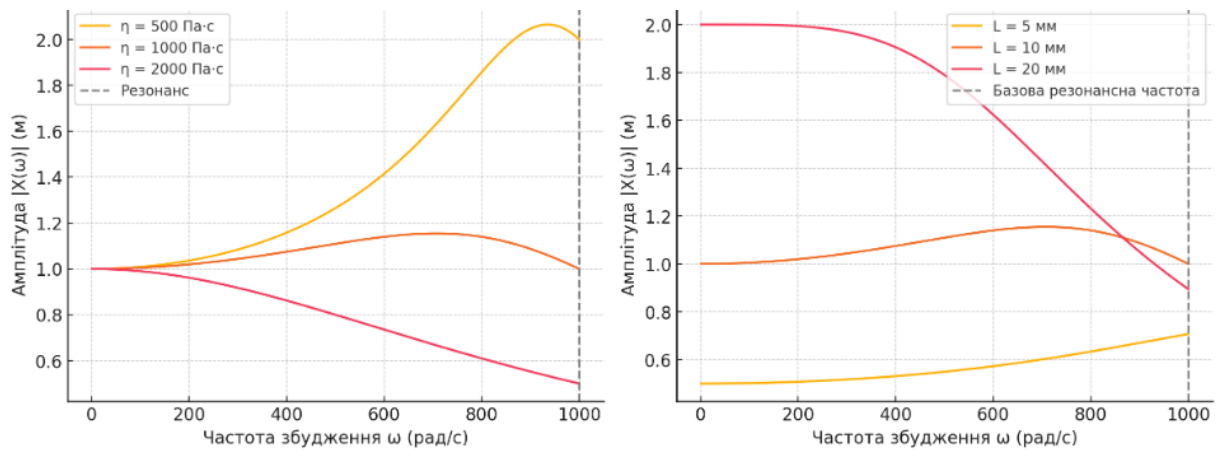


Рисунок 2 – Вплив коефіцієнта в'язкості та вплив товщини покриття

Вплив в'язкості: зі збільшенням в'язкості (від 500 до 2000 Па·с) пік амплітуди зменшується – ефективніше демпфування. Коливання стають менш інтенсивними на резонансі. Зростання η розширює частотний діапазон, де система поводить себе стабільно.

Вплив товщини покриття: товщина впливає на жорсткість $k = \frac{E \cdot A}{L}$, а отже – на резонансну частоту. Зі збільшенням товщини (від 5 мм до 20 мм) – жорсткість зменшується, а резонансна частота зсувається вліво (в нижчу частоту). Це важливо, якщо потрібно уникати резонансів у певному частотному діапазоні.

Як зміниться графік амплітудної характеристики при різних модулях Юнга E . Що змінюється при зміні модуля Юнга: Чим більший E (твердий матеріал) – тим вища жорсткість k . В результаті, резонансна частота $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ зростає. Тобто пік амплітуди зсувається праворуч (на вищі частоти). Для дуже твердих матеріалів амплітуда на низьких частотах буде меншою – система стає більш жорсткою, менш чутливою до повільних збурень.

2) Математичні моделі, які адекватно описують демпфуючі властивості антивібраційних покриттів залежно від їхніх фізико-механічних характеристик та умов експлуатації.

Опис математичних моделей, що адекватно відображають демпфуючі властивості антивібраційних покриттів, ґрунтується на врахуванні їхніх фізико-механічних характеристик (модуль пружності, коефіцієнт втрат, густина, товщина тощо) та експлуатаційних умов (температура, вологість, навантаження, частотний діапазон вібрації тощо). Ось кілька типових підходів і моделей:

Розглянемо модель комплексного модуля пружності. Це одна з найбільш поширених моделей для опису демпфування у в'язко-пружних матеріалах:

$$E^* = E' + iE'',$$

де E' – дійсна частина (зберігає енергію, пов'язана з жорсткістю);

E'' – уявна частина (відповідає за втрати енергії, тобто демпфування);

$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$ – коефіцієнт механічних втрат.

Модель Максвелла, де пружний і в'язкий елементи з'єднані послідовно:

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{E}{\eta}\sigma(t) = E \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Ця модель краще описує матеріали, які поступово «розслабляються» після зняття навантаження (релаксація напруження), актуально для антивібраційних матеріалів із пам'яттю форми.

Модель стандартного лінійного твердого тіла (Зайнера). Це поєднання моделей Максвелла і Кельвіна-Фойгта, що дозволяє точніше врахувати релаксацію і демпфування при різних умовах експлуатації:

$$\sigma(t) + \tau_\sigma \frac{d\sigma(t)}{dt} = E_1 \left[\varepsilon(t) + \tau_\varepsilon \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$$

Для прикладу розглянемо металеву верхню об'язку напіввагону, на яку нанесений шар антивібраційного полімерного покриття. Пластина піддається динамічному навантаженню. Опишемо, як це покриття зменшує амплітуду коливань.

1. Система має один ступінь вільності (модель маса–пружина–демпфер).

2. Вплив покриття враховується через збільшення демпфування і ефективної маси.
 3. Коливання гармонічні: $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$.
- Розглянемо спрощену математичну модель:

$$(m + m_p)\ddot{x}(t) + (c + c_p)\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos(\omega t),$$

де m – маса основної конструкції (наприклад, металеві пластини);
 m_p – ефективна маса покриття;
 c – початковий коефіцієнт демпфування (без покриття);
 c_p – демпфування, яке додає покриття;
 k – жорсткість конструкції;
 F_0 – амплітуда зовнішньої сили;
 ω – кутова частота навантаження.

Розглянемо амплітудну характеристику (у сталому режимі):
Амплітуда зміщення:

$$A(\omega) = \frac{F_0}{\sqrt{[(k - (m + m_p)\omega^2)^2 + ((c + c_p)\omega)^2]}}$$

Тут ми чітко бачимо, що збільшення $c_p \rightarrow$ зменшує амплітуду $A \rightarrow$ ефективне поглинання вібрацій.
Побудуємо графік амплітуди коливань в залежності від частоти (рис. 3).

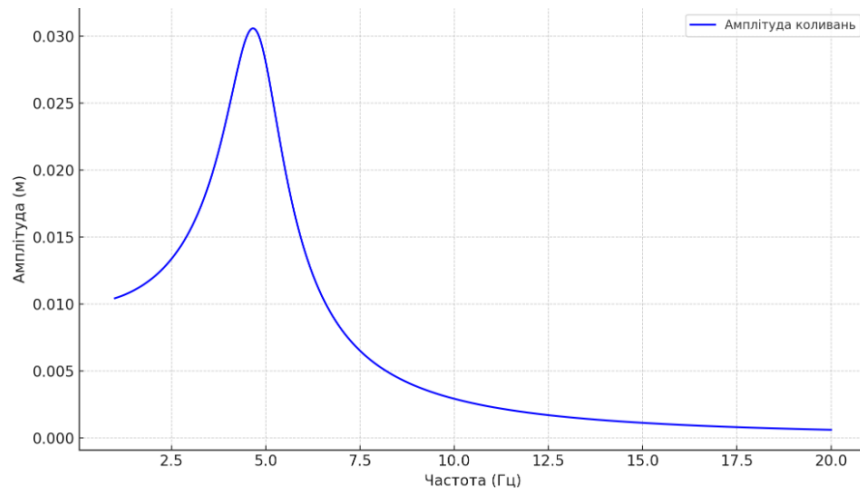


Рисунок 3 – Графік амплітуди коливань в залежності від частоти

З графіка бачимо максимальна амплітуда спостерігається поблизу резонансної частоти. Завдяки антивібраційному покриттю, пік амплітуди значно згладжений – тобто демпфування працює ефективно.
Побудуємо графік (рис. 4) вплив антивібраційного покриття на амплітуду коливань.

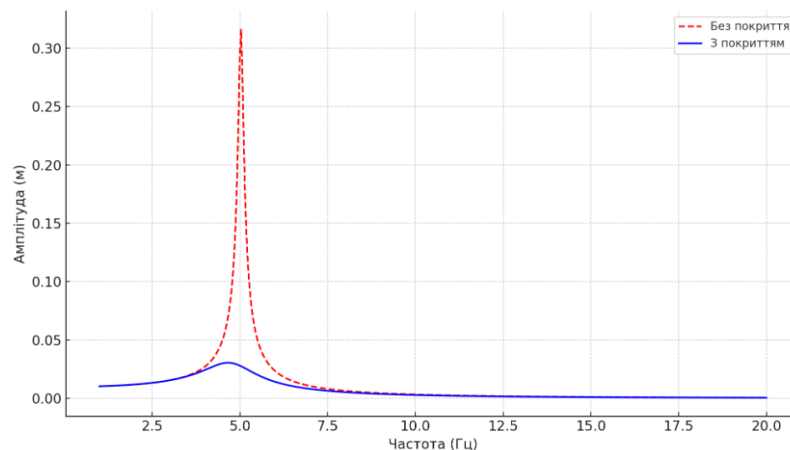


Рисунок 4 – Вплив антивібраційного покриття на амплітуду коливань

З графіка бачимо, червона пунктирна лінія – система без покриття: спостерігається високий резонансний пік. Синя лінія – система з антивібраційним покриттям: резонанс помітно зменшений і розширений. Це класичний приклад дії демпфування: зменшення амплітуди поблизу резонансної частоти та розширення діапазону робочих частот.

3) Розглянемо створення комп'ютерних моделей конкретних вузлів та агрегатів транспортних засобів з урахуванням нанесених антивібраційних покриттів.

За допомогою методу автоматизованого розрахунку – метод кінцевих елементів (МКЕ), реалізований у програмі SolidWorks Simulation. Розрахуємо верхню об'язку напіввагону на міцність.

Суть методу полягає в розбитті деякої області, в якій параметр, що нас цікавить змінюється за складним законом, на безліч підобластей, пов'язаних між собою в точках дотику. Закон зміни невідомого параметра у цих підобластях передбачається відомим (наприклад, лінійним чи квадратичним). Цей підхід дуже схожий на процес виміру криволінійного шляху на карті – коли складна крива замінюється набором пов'язаних по кінцях прямолінійних відрізків.

З погляду міцності областю служить обсяг деталі, яку ми хочемо порахувати. Безліч підобластей у цьому випадку – скінченно-елементна сітка (Mesh), що складається з трикутних пірамідок – скінченних елементів, пов'язаних між собою у вершинах, які називаються вузлами сітки (Node). Невідомим параметром є переміщення кожної точки цієї деталі під дією навантаження. Результатом розрахунку відповідно буде положення кожного вузла сітки, які відповідають реальному переміщенню цієї точки деталі під дією навантаження. Спираючись на ці результати, надалі можна отримати значення деформацій і напруг для кожного скінченного елемента або вузла.

Створення 3D-моделі. Верхня об'язка напіввагону (легована сталь), довжина деталі беремо 1540 мм, товщина металу 7 мм та зверху антивібраційне покриття з полімерного матеріала (гума), товщиною 5 мм (рис.4).

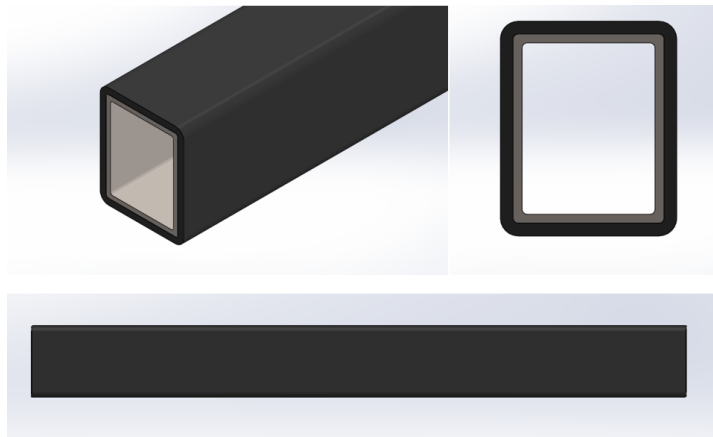


Рисунок 5 – Фрагмент верхньої об'язки напіввагону з антивібраційним полімерним покриттям

Масові характеристики: Щільність – 7700 кг/м^3 , маса – $50,41 \text{ кг}$, об'єм – $0,01 \text{ м}^3$, Площа поверхні – $3,26 \text{ м}^2$.

Проведемо статичний аналіз фрагменту деталі верхньої об'язки напіввагону на згин з антивібраційним полімерним покриттям в SolidWorks Simulation .

Фіксуємо деталь з двох сторін, з одного боку (лівого) вибираємо фіксовану геометрію (Fixed Geometry). А з іншого (правого) боку беремо не жорстке закріплення (Roller/Slider). Прикладаємо силу 10 кН , розподіляємо силу на ділянці з правого боку об'язки (рис.6).

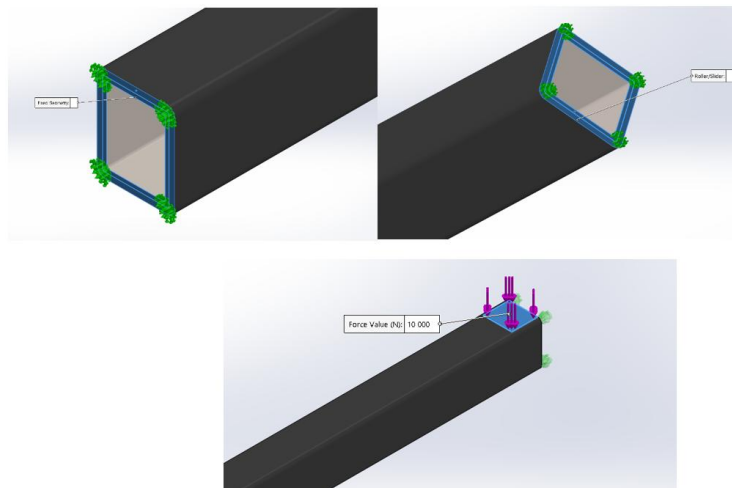


Рисунок 6 – Фіксація деталі верхньої об'язки напіввагону та прикладання сили

Розбиття моделі на скінченно-елементну сітку (рис.7). Максимальний розмір елемента – 49,6101 мм, Мінімальний розмір елемента – 3,06147 мм. Всього вузлів – 765572, всього елементів – 451888.

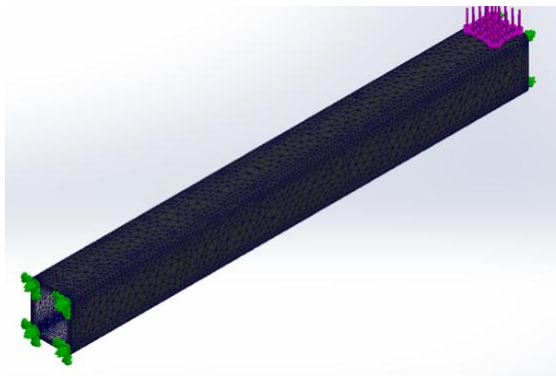


Рисунок 6 – Розбиття моделі на скінченно-елементну сітку

Після створення сітки моделі, проведемо дослідження та отримаємо епюри напружень, переміщень, деформації та запасу міцності (рис. 7).

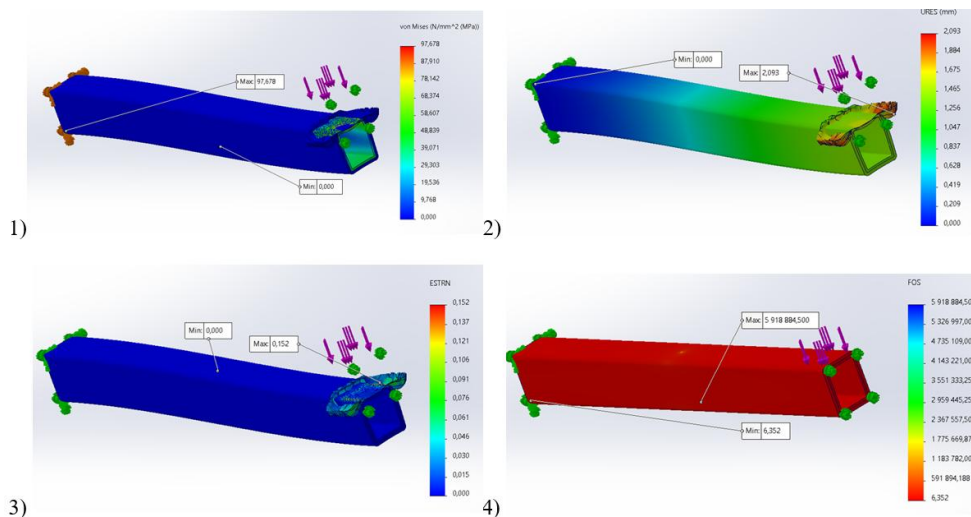


Рисунок 6 – Статичний аналіз фрагменту деталі верхньої об'язки напіввагону з антивібраційним полімерним покриттям: 1) епюра напружень; 2) епюра переміщень; 3) епюра деформації; 4) епюра запасу міцності

Бачимо епюра напружень, max значення 97,678 МПа, епюру переміщень деталі від дії навантаження, max значення 2,093 мм. Епюру деформації, max значення 0,152. Запас міцності деталі min значення 6,352 max значення 5 918 884,500.

4) Проведення серії чисельних експериментів для оцінки впливу різних параметрів покриттів (товщини, матеріалу, площі нанесення) на рівень вібрацій та довговічність конструкцій.

Розглянемо вплив товщини гумового покриття на продовження терміну служби металевих конструкцій, орієнтуючись на механізми втоми, зносу, корозії та вібрацій. Це критично важливо в таких сферах, як: машинобудування (платформи, кронштейни), транспорт (візки вагонів, ресори), енергетика (опори, каркаси), промислове обладнання (бункери, млини, жолоби).

Ключові функції гумового покриття для продовження ресурсу

Механізм впливу	Як гума допомагає	Роль товщини покриття
Амортизація навантажень	Знижує пікові напруження, що викликають втому металу	Чим товще – тим краще поглинає імпульси
Демпфування вібрацій	Зменшує циклічні навантаження	Оптимум 3–6 мм для динамічних систем
Захист від зносу	Зменшує прямий контакт абразивів з металом	Мінімум 2–3 мм, промислово до 10–12 мм
Бар'єр від корозії	Усуває контакт з вологим середовищем	Бажано суцільне і рівномірне покриття

2. Вплив товщини на довговічність: 3–6 мм – забезпечує баланс між: еластичністю (амортизація ударів); зносостійкістю; стабільністю адгезії; мінімальним ризиком зсуву чи відшарування. За надмірною товщиною (>8 мм) можуть бути ризики: повзучість гуми → зміщення навантаження на метал; внутрішні залишкові напруження; втрата контактної жорсткості → мікродари.

Моделювання ефективності покриття

Товщина гуми (мм)	Цикли до руйнування (втома)	Середній знос металу (мм/рік)	Корозійна активність (%)
0	1×10^5	0.35	100
2	2×10^5	0.18	55
4	4.2×10^5	0.08	15
6	4.8×10^5	0.05	5
8	4.6×10^5	0.05	4
10	4.3×10^5	0.04	3

З цієї таблиці бачимо оптимальний діапазон 4–6 мм: ресурс зростає в 4–5 разів при суттєвому зменшенні зносу та корозії. І можна зробити висновки, що гумові покриття товщиною 4–6 мм значно подовжують термін служби металевих конструкцій, знижуючи знос, вібрації та втому. Надмірна товщина (>8 мм) може бути шкідливою без правильного проектування (армування, фіксація, вентиляція). Якість адгезії, температура експлуатації та вид навантаження – критично важливі для стабільності ефекту.

Побудуємо графік (рис.7), який показує, як збільшення товщини гумового покриття впливає на: зменшення вібрацій (синя лінія), втомну довговічність конструкції (зелена лінія)

З графіка бачимо, що оптимальна зона – близько 5 мм. В цій спостерігається пікове зменшення вібрацій і висока довговічність без суттєвого зниження ефективності при подальшому збільшенні товщини.

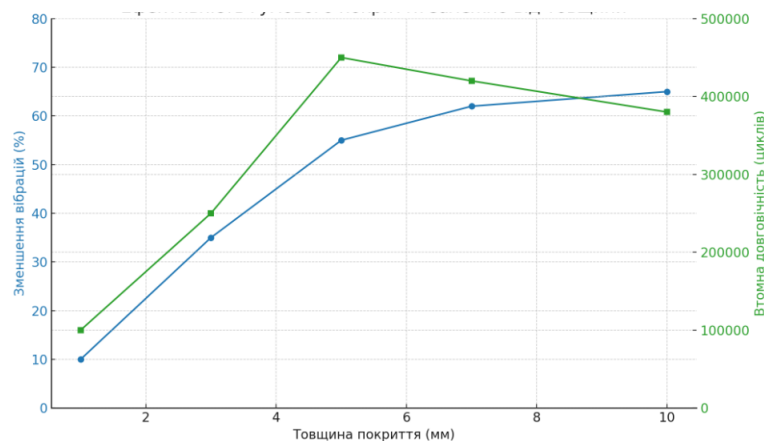


Рисунок 7 – Ефективність гумового покриття залежно від товщини

Висновки.

Комп'ютерне моделювання стало вирішальним інструментом для дослідження ефективності антивібраційних покриттів у транспортних засобах. Наукові дослідження, що використовують методи скінченних елементів та інші чисельні підходи, дозволяють глибоко аналізувати динамічну поведінку конструкцій під впливом вібрацій. Моделювання дає змогу віртуально тестувати різні типи та конфігурації антивібраційних матеріалів, оцінюючи їх здатність до демпфування коливань на різних частотах.

Одним з важливих наукових висновків є підтвердження значного зниження амплітуди вібрацій завдяки застосуванню правильно підібраних антивібраційних покриттів. Моделювання демонструє, як ці матеріали поглинають енергію коливань, перетворюючи її на тепло. Аналіз частотних характеристик виявляє оптимальні діапазони ефективності для конкретних типів покриттів і конструкцій. Крім того, моделювання допомагає дослідити вплив товщини, площі покриття та його розташування на загальну віброізоляцію транспортного засобу.

Прикладні висновки комп'ютерного моделювання є надзвичайно цінними для інженерів і розробників. Воно дозволяє оптимізувати конструкцію транспортних засобів на етапі проектування, зменшуючи потребу у дорогих фізичних прототипах та випробуваннях. Моделювання допомагає точно визначати місця найбільшої вібраційної активності, де застосування антивібраційних покриттів буде найбільш ефективним. Це сприяє підвищенню комфорту пасажирів шляхом зниження рівня шуму та вібрацій у салоні.

Застосування антивібраційних покриттів, підібраних на основі комп'ютерного моделювання, також призводить до збільшення терміну служби компонентів транспортних засобів. Зменшення вібраційних навантажень запобігає передчасному зносу та руйнуванню критично важливих деталей. Це особливо актуально для високошвидкісних транспортних засобів та машин, що працюють в умовах інтенсивних вібрацій.

Таким чином, комп'ютерне моделювання є незамінним інструментом для наукового обґрунтування та практичного впровадження антивібраційних технологій у транспортній галузі. Воно забезпечує глибоке розуміння процесів віброізоляції, оптимізує конструкційні рішення та сприяє створенню більш безпечних, комфортних та довговічних транспортних засобів. Подальший розвиток методів моделювання та розширення бази даних про властивості антивібраційних матеріалів відкриває нові перспективи для вдосконалення транспортної техніки.

Література

1. E. S. Ankuda et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 483 012039 DOI 10.1088/1757-899X/483/1/012039
2. A. Nusair Khan, J. Lu, Thermal cyclic behavior of air plasma sprayed thermal barrier coatings sprayed on stainless steel substrates, *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issue 8, 2007, Pages 4653-4658, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.022>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206013089>)
3. Dalong He, Fangkun Jiao, Dongbin Ou, He Gao, Jianying Wu, Thermal insulation and anti-vibration properties evaluation of modified epoxy resin-based thermal protection coatings in arc-jet, *Progress in Organic Coatings*, Volume 173, 2022, 107158, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107158>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944022004556>)
4. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
5. Le Huy CH, Thanh AT. Study on fabricating epoxy coatings reinforced with iron oxide flakes and nano silica. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2023;42(13-14):724-740. doi:10.1177/07316844231162562
6. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
7. Liang, S., Dai, Q., Huang, W. и Wang, X. (26 ноября 2024 г.). «MoS₂/Ti Co-Deposited Coatings and Their Fretting Wear Properties at Elevated Temperatures». *ASME. J. Tribol.* Июнь 2025 г.; 147(6): 061401. <https://doi.org/10.1115/1.4067042>
8. Luo, J., Cai, Z. B., Mo, J. L., Peng, J. F., & Zhu, M. H. (2015). Torsional Fretting Wear Behavior of Bonded MoS₂ Solid Lubricant Coatings. *Tribology Transactions*, 58(6), 1124–1130. <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1045649>
9. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Sagin, A., Tkachenko, I., Fomin, O., Píštěk, V., Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe (2022) *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (9), art. no. 1331. <http://www.mdpi.com/journal/jmse> doi: 10.3390/jmse10091331
10. Zhou, J., Zhang, L., Ding, Y., Chen, X., & Cai, Z. (2021). Impact Fretting Wear of MoS₂/C Nanocomposite Coating with Different Carbon Contents under Cycling Low Kinetic Energy. *Nanomaterials*, 11(9), 2205. <https://doi.org/10.3390/nano11092205>
11. Wu, S., Wu, S., Xing, S., Wang, T., Hou, J., Zhao, Y., & Li, W. (2024). Research Progress of Marine Anti-Fouling Coatings. *Coatings*, 14(9), 1227. <https://doi.org/10.3390/coatings14091227>
12. Yi-Hsuan Cheng, Cheng-Ta Wu, Lung-Hao Hu, Dual functional low surface energy coating of anti-corrosion / fouling via crosslinking polysilazane preceramic precursor incorporated with fluorine, *Progress in Organic Coatings*, Volume 177, 2023, 107409, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107409>. Yi-Hsuan Cheng, Cheng-Ta Wu, Lung-Hao Hu,
13. Cao, Z., & Cao, P. (2023). Research Progress on Low-Surface-Energy Antifouling Coatings for Ship Hulls: A Review. *Biomimetics*, 8(6), 502. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8060502>
14. Nwuzor, I.C., Idumah, C.I., Nwanonenyi, S.C. et al. Emerging trends in self-polishing anti-fouling coatings for marine environment. *Saf. Extreme Environ.* 3, 9–25 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42797-021-00031-3>
15. Chen, R., Jiang, J. & Wang, K. A Semi-active Vibration Isolation System with Adaptive Anti-resonance Control for Enhanced Performance. *J. Vib. Eng. Technol.* 13, 225 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42417-025-01784-y>
16. Mathew B, Banerjee P, Fawaz M, Roy S, Laha A, Bhatt M (2022) A review on vibration analysis of helicopter rotor blade. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 10:1363–1369. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40533>
17. Jialei Deng, Jinan Yang, Sujuan Jiao, Xinhua Long, Band-stop characteristics of a nonlinear anti-resonant vibration isolator for low-frequency applications, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 240, 2023, 107914, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107914>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740322007925>)

References

1. E. S. Ankuda et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 483 012039 DOI 10.1088/1757-899X/483/1/012039
2. A. Nusair Khan, J. Lu (2007). Thermal cyclic behavior of air plasma sprayed thermal barrier coatings sprayed on stainless steel substrates, *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issue 8, P. 4653-4658. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.022>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206013089>)
3. Dalong He, Fangkun Jiao, Dongbin Ou, He Gao, Jianying Wu, (2022). Thermal insulation and anti-vibration properties evaluation of modified epoxy resin-based thermal protection coatings in arc-jet, *Progress in Organic Coatings*, Volume 173, 107158, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.107158>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944022004556>)
4. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. (2018). Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
5. Le Huy CH, Thanh AT. (2023). Study on fabricating epoxy coatings reinforced with iron oxide flakes and nano silica. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 42(13-14): P. 724-740. doi:10.1177/07316844231162562
6. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
7. Liang, S., Dai, Q., Huang, W. и Wang, X. (2024). «MoS₂ /Ti Co-Deposited Coatings and Their Fretting Wear Properties at Elevated Temperatures». *ASME. J. Tribol.* 147(6): 061401. <https://doi.org/10.1115/1.4067042>
8. Luo, J., Cai, Z. B., Mo, J. L., Peng, J. F., & Zhu, M. H. (2015). Torsional Fretting Wear Behavior of Bonded MoS₂ Solid Lubricant Coatings. *Tribology Transactions*, 58(6), P. 1124–1130. <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1045649>
9. S. Sagin, O. Kuropyatnyk, A. Sagin, I. Tkachenko, O. Fomin, V. Pištěk, P. Kučera, (2022). Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (9), art. no. 1331. <http://www.mdpi.com/journal/jmse> doi: <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
10. Zhou, J., Zhang, L., Ding, Y., Chen, X., & Cai, Z. (2021). Impact Fretting Wear of MoS₂/C Nanocomposite Coating with Different Carbon Contents under Cycling Low Kinetic Energy. *Nanomaterials*, 11(9), P. 2205. <https://doi.org/10.3390/nano11092205>
11. Wu, S., Wu, S., Xing, S., Wang, T., Hou, J., Zhao, Y., & Li, W. (2024). Research Progress of Marine Anti-Fouling Coatings. *Coatings*, 14(9), P. 1227. <https://doi.org/10.3390/coatings14091227>
12. Yi-Hsuan Cheng, Cheng-Ta Wu, Lung-Hao Hu, (2023). Dual functional low surface energy coating of anti-corrosion / fouling via crosslinking polysilazane preceramic precursor incorporated with fluorine, *Progress in Organic Coatings*, Volume 177, 107409, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107409>.
13. Cao, Z., & Cao, P. (2023). Research Progress on Low-Surface-Energy Antifouling Coatings for Ship Hulls: A Review. *Biomimetics*, 8(6), 502. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8060502>
14. Nwuzor, I.C., Idumah, C.I., Nwanonyeni, S.C. et al. (2021). Emerging trends in self-polishing anti-fouling coatings for marine environment. *Saf. Extreme Environ.* 3, P. 9–25. <https://doi.org/10.1007/s42797-021-00031-3>
15. Chen, R., Jiang, J. & Wang, K. (2025). A Semi-active Vibration Isolation System with Adaptive Anti-resonance Control for Enhanced Performance. *J. Vib. Eng. Technol.* 13, 225. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-01784-y>
16. Mathew B, Banerjee P, Fawaz M, Roy S, Laha A, Bhatt M (2022). A review on vibration analysis of helicopter rotor blade. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 10: P. 1363–1369. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40533>
17. Jialei Deng, Jinan Yang, Sujuan Jiao, Xinhua Long, (2023). Band-stop characteristics of a nonlinear anti-resonant vibration isolator for low-frequency applications. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 240. 107914, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740322007925>)

This study examines and analyzes methods of computer modeling for predicting and optimizing the efficiency of anti-vibration coatings in mitigating the negative impact of vibrations on structural components of transport vehicles. The work focuses on the development and refinement of computer modeling approaches to evaluate the performance of anti-vibration coatings in transport structures. Particular attention is paid to the modeling of interactions between elastomeric materials and metallic substrates under cyclic loading conditions, which are typical for automotive, railway, and aerospace applications. Numerical models based on the finite element method (FEM) are proposed, allowing the consideration of complex physical and mechanical properties of coating materials (nonlinear deformation, hysteresis losses, temperature dependence) and dynamic excitation across a wide frequency range. A series of virtual experiments was conducted, varying geometric parameters of the coating (thickness, coverage area) to assess their influence on vibration transmission and stress distribution in the structure. The simulation results demonstrate that optimizing the thickness and placement of the coating can reduce peak vibration amplitudes by up to 60% and increase the fatigue life of structures by 2–3 times. Understanding how specific material properties affect damping performance enables the optimization of material selection and structural design for specific operating conditions. This research also investigates the effect of rubber coating thickness on the durability of metal structures. Emphasis is placed on the coating's role in reducing fatigue failure, vibration-induced stresses, wear, and corrosion. Rubber, as a damping and protective material, significantly enhances the operational characteristics of structures by absorbing dynamic loads and isolating the metal from aggressive environments. Based on generalized experimental data, the optimal

thickness of the rubber layer is determined to be 4–6 mm. Within this range, the maximum reduction in vibration amplitude (up to 60–70%), a more than fivefold decrease in metal wear, and a 3–4 times increase in fatigue life are observed. However, excessive thickness (>8 mm) may lead to reduced stiffness, material creep, or delamination of the coating. The obtained results can be used to optimize design solutions in mechanical engineering, transportation, energy, and other industries where reliability and long service life of metal elements under dynamic and corrosive influences are crucial. The developed methodology is a universal tool for engineering analysis and can be integrated into the design process of new transport systems with enhanced vibration resistance. Anti-vibration coatings are widely used in mechanical engineering, aviation, and construction to reduce the harmful effects of vibrations.

Key words: *transport, mechanics, wagons, computer modeling, engineering graphics, vibration, protective coatings.*

Фомін О. В. д.т.н., професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, fominaleksejvictorovic@gmail.com

Козинка О. С. аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, kozynka1520mm@gmail.com

Лопатюк С. П. к.т.н., доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін, Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, lsp_maritime@ukr.net

Фурсина А. Д. доцент кафедри «Теоретичної та прикладної механіки», Національний університет «Запорізька політехніка», fursina.anna@gmail.com