https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.32.272

УДК 624.21

Артьомов В. Є.[1], *канд. техн. наук, https://orcid.org/0009-0005-2699-5477*
Андрусяк А. В.[1], *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0003-2099-9045*
Білоус І. І.[2], *https://orcid.org/0009-0002-9881-6683*

[1]*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*
[2]*Заклад вищої освіти «Університет Короля Данила», м. Івано-Франківськ, Україна*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОГОНОВІ БУДОВИ МОСТІВ ЗА НОРМАМИ ПРОЄКТУВАННЯ УКРАЇНИ ТА ВІЙСЬКОВИМИ СТАНДАРТАМИ НАТО STANAG/TDTC

Анотація

Вступ. Зростання інтенсивності та маси транспортних потоків, як цивільних, так і військових, створює значні виклики для мостової інженерії, що вимагає постійного оновлення та вдосконалення методів оцінки вантажопідйомності та безпеки мостів. Об'єкти української інфраструктури, що постраждали від російсько-української війни (зокрема, мости), потребують швидкого відновлення та забезпечення надійності. Пропоноване дослідження проводить порівняльний аналіз українських державних будівельних норм (ДБН) з Тристороннім кодексом НАТО для проєктування та випробувань військових мостів і переправних конструкцій (TDTC). Результати дослідження допомагають оцінити сумісність існуючих цивільних мостів із сучасною військовою технікою та надають рекомендації для проєктувальників щодо імплементації закордонних військових стандартів. У цілому, публікація сприяє гармонізації українських будівельних норм із міжнародними стандартами в рамках євроатлантичної інтеграції України.

Проблематика. Проблематика дослідження полягає у відсутності відкритих даних про роботу мостів під військовими навантаженнями та необхідності систематичного порівняння методологій цивільного та військового мостобудування. Російсько-українська війна підкреслила вразливі місця в інфраструктурі, що зумовило гостру потребу в порівняльному аналізі стандартів проєктування. Цивільний сектор прагне до точності та оптимізації життєвого циклу конструкцій, використовуючи імовірнісні моделі, тоді як військовий — до швидкості та тактичної мобільності, застосовуючи спрощені, детерміновані системи, як-от MLC. Існуючі дослідження виявили інформаційні прогалини, зокрема: недостатній аналіз динамічної взаємодії військових колон, брак стандартизованого протоколу перехресної оцінки, а також обмеженість відкритих даних про рух військових транспортних засобів. Ці проблеми перешкоджають повноцінному інженерному аналізу та забезпеченню безперебійного, безпечного функціонування української інфраструктури.

Результати. Порівняльний аналіз показав, що в цілому зосереджене колісне навантаження від військової техніки НАТО до класу MLC 70 та розподілений контактний тиск від усіх класів (до MLC 150 включно) не перевищують значень, закладених в українських будівельних нормах. Проте, аналіз згинальних моментів в прогоновій будові моста розрізної схеми дає іншу, більш точну картину сумісності. Для мостів, спроєктованих під навантаження А11, допустимими є класи MLC 30 та нижче. Для навантаження А15 пороговим є клас 40. Споруди, розраховані на модель НК-80, можуть пропускати військову техніку до 100 класу MLC, а мости з урахуванням навантаження НК-100 відповідають практично всім класам військової техніки STANAG.

Висновки. Українські будівельні норми та військові стандарти НАТО (TDTC) мають принципово різну філософію: цивільний сектор орієнтований на точність та оптимізацію, тоді як військовий — на швидкість й тактичну мобільність. Хоча порівняння зовнішніх характеристик навантажень (зосереджений та розподілений тиск) свідчить про те, що українські норми є достатньо надійними, аналіз внутрішніх зусиль дає більш точні висновки. Для забезпечення повної сумісності мостів з військовою технікою необхідні подальші, деталізовані розрахунки, що враховують динамічні ефекти

та інші специфічні чинники. Представлена робота є початковим етапом для подальших досліджень, спрямованих на гармонізацію українських та міжнародних стандартів, що є важливим кроком для зміцнення обороноздатності та інфраструктури України.

Ключові слова: аналіз, ДБН, екіпаж, міст, модель, навантаження, НАТО, стандарт, STANAG, MLC.

Вступ

Постановка проблеми

Зростання інтенсивності та маси транспортних потоків, як цивільних, так і військових, становить неабиякий виклик для мостової інженерії. Точна оцінка вантажопідйомності, несучої здатності та безпеки мостів вимагає постійного оновлення та вдосконалення. Мостові конструкції, які раніше розраховувалися з використанням консервативних, усереднених моделей, дедалі більше піддаються впливу трафіку, який характеризується високою варіативністю, динамічністю та непередбачуваністю [3, 15, 16, 18]. У цьому контексті виникає потреба в систематичному аналізі та порівнянні методологій, що застосовуються для цивільного та військового мостобудування.

З іншого боку, відкритих даних про роботу мостів під навантаженнями військового часу — критично мало. Російсько-українська війна, що розпочалася у 2014 році та набула повномасштабного характеру 24 лютого 2022 року як найбільший збройний конфлікт у Європі з часів Другої світової війни, стала викликом не лише для України, а й для міжнародної системи безпеки, виявивши вразливі місця в обороні та інфраструктурі. То ж у сучасному контексті відновлення та забезпечення надійності інфраструктури, що зазнала руйнувань, порівняльний аналіз стандартів проєктування є надзвичайно актуальним. Особливе значення має зіставлення вимог до транспортних навантажень, визначених українськими державними будівельними нормами (ДБН), з Тристороннім кодексом НАТО для проєктування та випробувань військових мостів і переправних конструкцій (Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment, TDTC).

Ця робота заповнює наукову прогалину, пропонуючи аналіз двох різних підходів: моделей транспортних навантажень у ДБН та індексованої системи військового класу навантажень (Military Load Classification, MLC) у TDTC. Результати дослідження покращують оцінку сумісності існуючих цивільних мостів з сучасною військовою технікою, а також надають практичні рекомендації для проєктувальників щодо подальшої імплементації закордонних військових стандартів для підвищення надійності інфраструктури. Автори сподіваються, що ця публікація стане важливим внеском у дискусію щодо гармонізації українських будівельних норм із міжнародними стандартами, яка є невід'ємною частиною євроатлантичної інтеграції України.

Актуальність теми

Дослідження, що стосуються порівняння українських і міжнародних військових стандартів, мають не лише теоретичну, а й практичну цінність, допомагаючи Україні зміцнювати свою обороноздатність і успішно рухатися до перемоги. Зазначимо кількох таких ключових аспектів.

1. Підвищення стійкості інфраструктури. Російські війська систематично знищують критичну інфраструктуру, зокрема мости, щоб перешкодити пересуванню українських військ та постачанню. У відповідь на це, Україна потребує швидких та ефективних рішень для відновлення логістичних шляхів. Дослідження, що порівнюють цивільні будівельні норми із військовими стандартами НАТО, дозволять оцінити можливість використання існуючих мостів та переправ для пересування важкої військової техніки, а також використати міжнародний досвід і передові практики для проєктування і будівництва нових, більш стійких та надійних мостових споруд.
2. Гармонізація зі стандартами НАТО. Україна обрала курс на євроатлантичну інтеграцію. Це означає не лише політичне та військове партнерство, але й перехід на єдині стандарти та процедури. Вивчення і впровадження світових стандартів, як-от STANAG, є необхідною умовою для повної інтеграції Збройних Сил України до системи колективної оборони НАТО. Дослідження TDTC та його зв'язку зі STANAG 2021 сприяє співпраці з арміями країн-членів Альянсу (особливо в питаннях логістики та інженерного забезпечення), а також розробці й виробництву українського військового обладнання, яке буде повністю сумісним із західними зразками.
3. Науковий та технічний розвиток. Війна стимулює інновації та науково-технічний прогрес. Порівняння стандартів мостобудування є важливим елементом цього процесу, що сприяє розвитку

вітчизняної інженерної думки та дозволяє адаптувати світові наукові досягнення до унікальних потреб української оборони та післявоєнного відновлення. Ці питання також підсвічують гостру необхідність загальної діджиталізації цивільної та військової інженерії, зокрема з розробкою спеціалізованих цифрових рішень оборонної тематики [17, 18].

Аналіз наукових публікацій наочно показує, що і цивільне, і військове мостобудування рухаються від спрощених детермінованих моделей до більш точних, імовірнісних та динамічних. Однак їхні філософії та пріоритети все ще залишаються різними: цивільний сектор прагне до точності та оптимізації життєвого циклу, а військовий — до швидкості та тактичної мобільності.

Існуючі наукові дослідження свідчать, що концентровані навантаження від реального цивільного трафіку можуть перевищувати проєктні значення, а динамічні ефекти на коротких прогонах з неякісним покриттям можуть бути значно вищими за нормативні. Щодо MLC, то ця система військових навантажень є ефективною для швидкої «польової» оцінки, але може виявитися недостатньою для повноцінного інженерного аналізу [4].

Подолання виявлених прогалин є критично важливим для забезпечення міцності, ефективності та безпеки транспортної інфраструктури, як в умовах мирного часу, так і під час надзвичайних ситуацій. Перехід до імовірнісних та гібридних моделей, а також впровадження інтелектуальних моделей та концепцій BIM, є ключовими для майбутнього інженерії мостів. Ці технології забезпечать повну прозорість, точність та ефективність на всіх етапах життєвого циклу конструкцій, що дозволить приймати більш обґрунтовані рішення та оптимізувати використання ресурсів [6, .9].

Аналіз останніх досліджень

Military Load Classification (MLC) є основним методом класифікації навантажень для військового мостобудування, стандартизованим НАТО (STANAG 2021). Ця система визначає параметри навантаження від транспортних засобів (колісних та гусеничних) у вигляді єдиного числового значення. MLC заснована на наборі з 16 гіпотетичних стандартних колісних і 16 гусеничних транспортних засобів, які є типовими для країн-членів НАТО. Кожен клас MLC визначає повну вагу, геометрію та максимальне навантаження на вісь, що дозволяє інженерам або військовим підрозділам швидко оцінити можливість проїзду через міст.

Ключовим принципом системи MLC є забезпечення швидкої та безпечної оцінки в польових умовах, що повністю підпорядковується пріоритету тактичної мобільності [10]. Цей підхід є детермінованим та спрощеним, що дозволяє миттєво приймати рішення в умовах бойових дій або надзвичайних ситуацій, але не дає деталізованих даних для глибокого інженерного аналізу конструкції (хоча огляд останніх публікацій свідчить, що науковці почали застосовувати для визначення ваги військових екіпажів імовірнісні підходи [12]).

Динамічні та інші коефіцієнти, що використовуються у військових стандартах, залежать від національних норм та процедур розрахунку. Аналіз свідчить, що військові стандарти, як правило, застосовують менші коефіцієнти надійності (коефіцієнти безпеки) для рухомих навантажень, порівняно з цивільними [13]. Що стосується динамічних ефектів, то деякі військові норми припускають лінійну залежність динамічного коефіцієнта від довжини прогону, а для дуже низьких швидкостей (до 5 км/год) динамічний ефект може бути повністю відкинутий [8]. Важливо, що в деяких стандартах, як-от STANAG 2021, рекомендації щодо цих коефіцієнтів віддані на розсуд національним інженерним службам [13]. Це створює певну прогалину в стандартизації та може призвести до невідповідностей в оцінці несучої здатності інженерами різних країн та проєктних організацій.

Фундаментальна відмінність між цивільними та військовими підходами до моделювання навантажень полягає у філософії дизайну як такого. Цивільні мости оптимізуються за співвідношенням витрат та вигод протягом усього життєвого циклу, що вимагає використання складних імовірнісних моделей, які забезпечують доволі точну оцінку та ефективне управління інфраструктурними активами [11, 14]. Військові мости, навпаки, оптимізуються за швидкістю розгортання та мобільністю, що вимагає простих, детермінованих і надійних систем класифікації (як-от MLC). Ця базова відмінність є першопричиною розбіжностей у всіх інших аспектах, включаючи моделі навантажень, коефіцієнти та ін.

Практична потреба в уніфікації цивільних та військових підходів постійно зростає. Військові конвої регулярно використовують цивільні мости під час навчань або розгортання [12]. З іншого боку, військові мости, розроблені для швидкого перекидання через перешкоди, все частіше

використовуються для надання допомоги цивільному населенню (наприклад, під час війни або природних катастроф). Ця взаємозалежність створює зростаючий попит на міждисциплінарні рішення та об'єднання підходів [11].

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, у наявних матеріалах виявлено кілька критичних прогалин.

1. Недостатній аналіз динамічної взаємодії військових колон. Хоча теоретичні дослідження глибоко вивчають динамічні ефекти смуг вантажівок [5], вони не містять аналогічного аналізу динаміки руху військових конвоїв на мостах, особливо середніх та великих. Враховуючи, що військові колони є щільними, важкими та можуть рухатися з високою швидкістю, їхній динамічний вплив на конструкцію мосту може бути значним і, ймовірно, відрізнятиметься від цивільного трафіку. Цей аспект є невивченою, але надзвичайно важливою областю для забезпечення безперервного життєвого циклу та загальної безпеки інфраструктури.

2. Брак стандартизованого протоколу перехресної оцінки. Дослідження демонструють взаємозастосовність цивільної та військової інфраструктури, але не пропонують стандартизованого фреймворку для оцінки несучої здатності цивільних мостів під військовими навантаженнями, та навпаки [12]. Детермінований характер системи MLC є недостатнім для точного інженерного розрахунку — особливо в умовах, коли міст цивільного призначення перебуває в експлуатації тривалий час.

3. Обмеженість даних. Хоча системи збору великих масивів даних про реальну вагу транспортних засобів, їхню швидкість та кількість осей без переривання руху є ключовими для транспортної галузі, аналогічні відкриті набори даних для військових маршрутів — обмежені. Це перешкоджає детальному імовірнісному моделюванню динаміки військового трафіку та його впливу на конструкції.

Порівняння моделей важкої військової техніки за стандартом STANAG з національними моделями навантажень АК, НК

Тристоронній кодекс для проєктування та випробувань військових мостів і переправних конструкцій (TDTC) є основоположним документом і водночас частиною більш широкої системи стандартизації НАТО. Цей норматив був розроблений та узгоджений між Німеччиною, Великою Британією та США для забезпечення взаємосумісності мостових елементів (згодом прийнятий в рамках Альянсу як Натовська інженерна публікація AEP-4865).

Ключовим елементом TDTC є концепція класу військового навантаження (Military Load Classification, MLC), яка стандартизує класифікацію мостів і транспортних засобів. Ця система класифікації є основою для STANAG 2021 і визначає єдині вимоги для оцінки та використання мостів та понтонних переправ. Таким чином, TDTC не лише слугує технічним посібником, але й є невід'ємною частиною нормативно-правової бази НАТО, яка гарантує ефективну координацію та мобільність військових сил на єдиному європейському театрі дій.

Важливо зазначити, що кодекс TDTC не є суворо директивним. Він не охоплює багатьох специфічних аспектів, необхідних для повноцінного проєктування мостових конструкцій. Цей стандарт містить узагальнені підходи та моделі навантажень, тому в загальному випадку інженер має орієнтуватися на керівні документи країни, в якій виконуються основні проєктні роботи — ДБН, ДСТУ в Україні; BSI — у Великій Британії; Єврокоди — в країнах Європи, тощо. TDTC відкритий для публічного доступу і, на відміну від багатьох інших секретних військових документів, доступний для ознайомлення. Це важливо, оскільки відкритий доступ дозволяє інженерам, дослідникам та виробникам, що працюють у цивільному та оборонному секторі, брати участь у розробці сумісних мостових конструкцій та систем.

В кодексі TDTC представлено гіпотетичні моделі гусеничного і колісного навантаження STANAG 2021, які віднесені до 16 окремих класів: 4, 8, 12, 16, 20, 24, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150. Клас дає наближене значення загальної ваги екіпажу; точне значення вказане у Додатку С [2]. Як бачимо, найнижчому класу MLC 4 відповідає найлегша бойова техніка вагою до 4 т, а найвищому MLC 150 — гусеничні машини вагою до 140 т та колісні до 155 т.

Найвідповіднішим прототипом гусеничного навантаження в STANAG / TDTC є танк, однак в загальному випадку це може бути інша транспортна одиниця — гусенична бойова машина піхоти (БМП), бронетранспортер (БТР), самохідна артилерійська установка (САУ), тощо. Ці навантаження

мають постійну геометрію та відрізняються лише вагою і габаритами: довжиною гусениць, шириною ходової частини (розмір по зовнішнім граням гусениць) та шириною однієї площини гусениць (довжина траку).

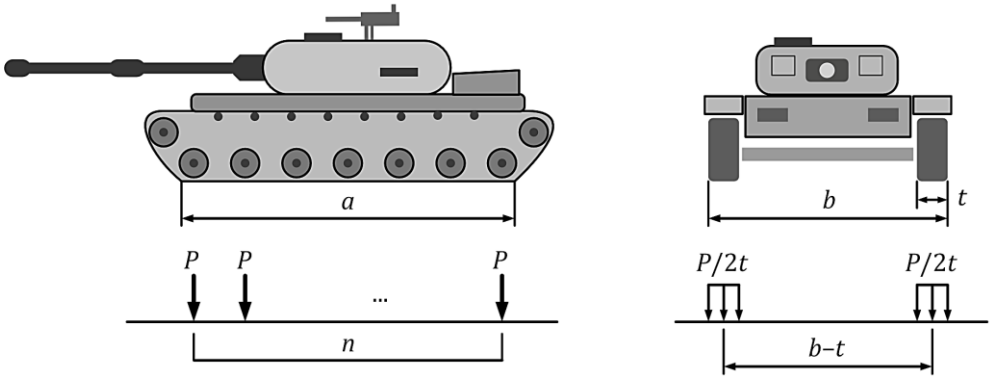

Рисунок 1 — Схема гусеничного навантаження за моделлю STANAG 2021

За структурою, ця модель близька до тандемного навантаження в смугах АК або одиночного чотиривісного екіпажу НК [1]. Безпосередньо у розрахунках інженер має оперувати зосередженим тиском від кожної колісної пари екіпажу, прикладаючи це зосереджене (вздовж мосту) або розподілене (поперек мосту) навантаження до відповідних елементів прогонової будови. Слід зауважити, що кількість ведучих коліс в ходовій частині екіпажу залежить від класу навантаження MLC [2], а у випадку реальної військової техніки у розрахункову модель слід закладати відповідні реальні вагові та геометричні характеристики.

На основі даних [1, 2] виконано порівняльний аналіз зосередженого (**рис. 2**) та розподіленого (**рис. 3**) тиску за моделями STANAG 2021 та ДБН В.1.2-15:2009.

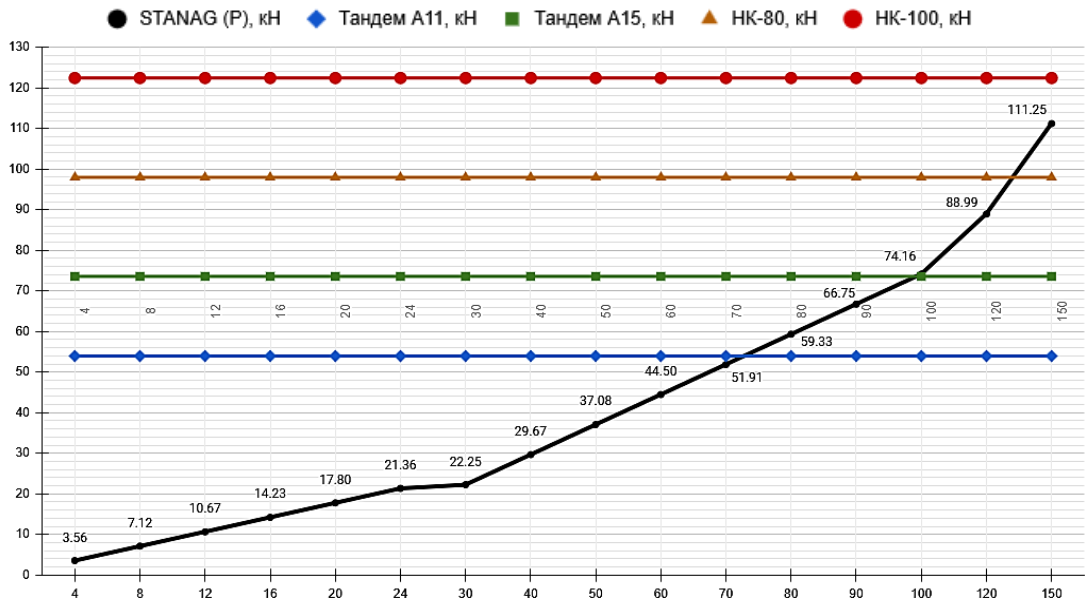

Рисунок 2 — Зосереджений тиск від колеса екіпажу STANAG, тандему А11 та А15, машини НК-80 та НК-100 (кН)

Горизонтальна вісь на обох графіках містить класи військового навантаження MLC. Вертикальна вісь відображає зосереджене зусилля від одного колеса в кН (**рис. 2**) та розподілений тиск цього ж колеса в кН/м (**рис. 3**). Моделі STANAG / TDTC порівнюються з відповідними навантаженнями від тандему АК (класів 11 та 15) та одиночними екіпажами НК-80 і НК-100.

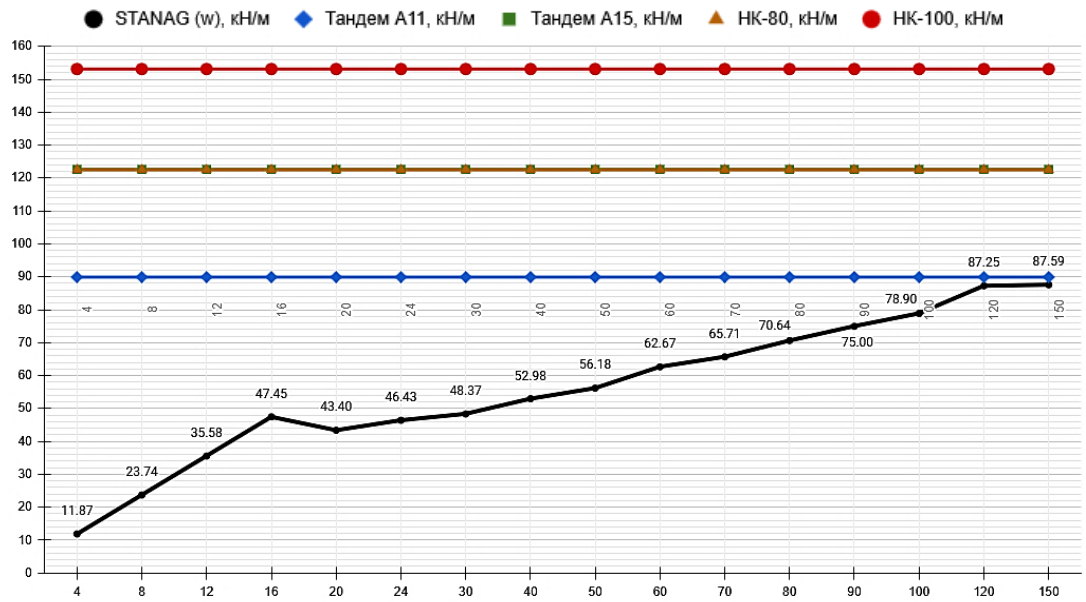

Рисунок 3 — Контактний тиск від колеса екіпажу STANAG, тандему А11 та А15, машини НК-80 та НК-100 (кН/м)

Як бачимо, зосереджене колісне навантаження від гусеничної військової техніки НАТО до 70-го класу включно є нижчим за моделі, що використовуються в українських нормах проєктування капітальних мостів на автомобільних дорогах усіх категорій. Екіпажі від 70 до 100 класу MLC є важчими за тандеми А11, але легшими за тандеми А15. Екіпажі класів 100 і 120 «працюють» в межах національного навантаження НК-80 (екіпаж класу 150 перевищує його). Жодна гіпотетична одиниця військової техніки за класифікацією MLC не перевищує відповідного колісного навантаження найважчої мостової моделі НК-100. Що до розподіленого навантаження (так званої «контактної плями»), то моделі усіх класів (до MLC 150 включно) не перевищують показники, наведені в ДБН В.1.2-15:2009.

Варто зазначити, що порівняння суто вагових характеристик транспорту не дає однозначної відповіді про роботу конструкції під цим навантаженням. Оскільки розглянуті моделі відрізняються не тільки величиною контактного тиску, а й розташуванням сил у просторі (геометрією), то відмінність між ними варто дослідити, порівнюючи параметри напружено-деформованого стану (тобто через внутрішні зусилля, спричинені цими навантаженнями). З цією метою розглянемо шарнірно обперту балку довжиною 10 м, яка моделює розрізну прогонову будову автодорожнього мосту:

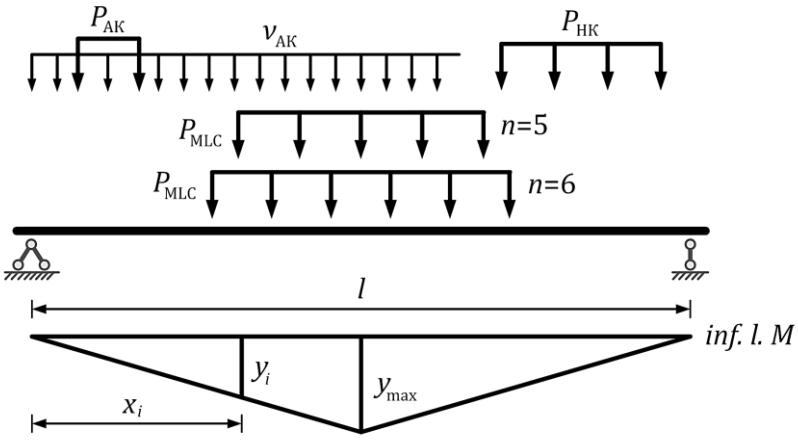

Рисунок 4 — Схеми навантажень АК, НК, MLC та лінія впливу згинального моменту в центральному перерізі прогонової будови моста

Послідовно завантажуємо лінію впливу згинального моменту п'ятьма типами моделей: екіпажами MLC усіх класів; розподіленим смуговим навантаженням з тандемом А11, А15; одиночними екіпажами НК-80, НК-100. Використовуємо характеристичні (нормативні) значення навантажень, без ексцентриситетів. За отриманими сумарними моментами будуємо наступні співвідношення:

— Момент від MLC / Момент від А11;
— Момент від MLC / Момент від А15;
— Момент від MLC / Момент від НК-80;
— Момент від MLC / Момент від НК-100.

Результати розрахунків наведені на **рис. 5**.

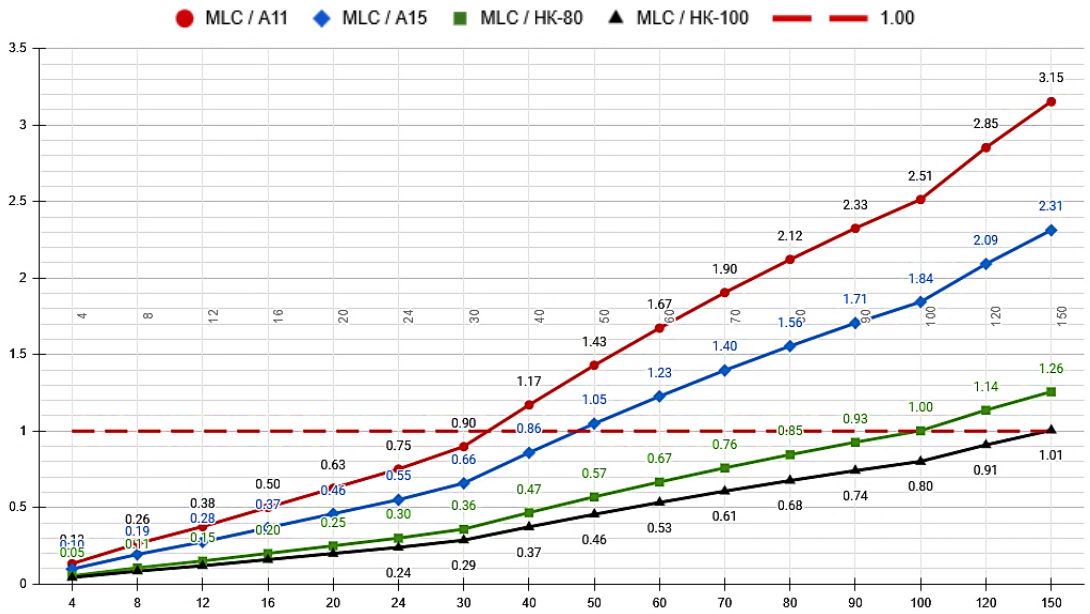

Рисунок 5 — Співвідношення максимальних моментів в розрізній прогоновій будові моста від екіпажів MLC та навантажень А11, А15, НК-80, НК-100

Вертикальна вісь тут є безрозмірною і характеризує співвідношення моментів. Значення нижче одиниці свідчать про допустимість навантаження MLC в межах національного підходу, вище — про його наднормативність. Отже для мостів, побудованих під навантаження А11, допустимими є класи MLC 30 та нижче, а для навантаження А15 — до 40 класу включно. Національна модель одиничного чотиривісного колісного екіпажу НК-80 обмежує використання військової техніки до 100 класу включно. Споруди, запроєктовані з урахуванням моделі НК-100, відповідають екіпажам MLC практично усіх класів (у рамках прийнятих у дослідженні припущень).

Висновки

На основі виконаного аналізу можна зробити висновок, що українські норми та військові стандарти НАТО, зокрема Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment та STANAG 2021, мають принципово різну філософію, що відображається у їхніх моделях навантажень. Якщо цивільний сектор прагне до оптимізації та точності через складні імовірнісні моделі, то військовий орієнтується на швидкість і тактичну мобільність, використовуючи спрощену систему MLC.

Проведені дослідження порівнюють вітчизняні будівельні норми на проєктування мостів ДБН В.1.2-15:2009 з військовими нормами STANAG 2021 / TDTC, аналізуючи як зовнішні характеристики навантажень, так і напружено-деформований стан прогонової будови. Аналіз, представлений на **рис. 2** і **рис. 3**, показав, що зосереджене навантаження від військової техніки НАТО до MLC 70, а також розподілений контактний тиск від усіх класів військової техніки (до MLC 150) не