

Проект багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів на основі інноваційної компонувальної схеми

Войтків С.В.¹

¹Науково-технічний центр "Автополіпром", Україна

Анотація. У статті проаналізовані конструкції сучасних моделей багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів, їх переваги і недоліки та запропонована інноваційна компонентна схема на основі застосування одновісних колісних візків. В ході дослідження було розроблено проект трьох типорозмірних рядів модульно-уніфікованих дво-, три- та чотирисекційних трамвайних вагонів, розраховані їх основні розмірні параметри, параметри мас та пасажировмістимості. Результати аналітичних досліджень показали, що експлуатаційна ефективність таких пасажирських транспортних засобів дуже залежить від конструктивних особливостей за компонентними схемами ходової частини та планування пасажирських салонів, а також від оптимізації їх розмірних параметрів, параметрів мас та вмістимості. Проведена порівняльна оцінка експлуатаційної ефективності багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів сучасних моделей та розроблених проектів на основі запропонованої компонентної схеми підтвердила доцільність її застосування для створення їх нових перспективних і конкурентоспроможних моделей.

Ключові слова: міський електротранспорт, зчленований трамвайний вагон, інноваційна компонентна схема, номінальна пасажировмістимість, коефіцієнт експлуатаційної ефективності.

Вступ

Трамвайний транспорт відноситься до одного з видів екологічно чистого транспорту у системі міських перевезень пасажирів. Тому він доволі широко застосовується у багатьох країнах світу, зокрема, і у 22 вітчизняних містах. Довжина мереж вітчизняних трамвайних колій становить понад 2000 км, а щорічний обсяг перевезень пасажирів сягає 3 млрд. пасажирів.

Проте, сучасний стан рухомого складу та наявних мереж трамвайного транспорту характеризується низкою суттєвих недоліків, серед яких:

- велика частка парку трамвайних вагонів, які вичерпали встановлений експлуатаційний ресурс – не більше 15 років;
- велика частка вагонів застарілих моделей, конструкції яких характеризуються високим рівнем підлоги у пасажирських приміщеннях;

– незадовільний стан багатьох мереж трамвайних колій та контактних електричних мереж.

Станом на 01 січня 2022 року вітчизняний парк пасажирських трамвайних вагонів складав 2314 од., з яких лише 99 можна вважати новими і такими, які відповідають сучасним вимогам до перевезень пасажирів. Окрім того, лише 204 вагони перебували в експлуатації менше 15 років. Загальна зношеність всього парку трамвайних вагонів станом на початок 2022 року сягала 92,2 %.

Проблема поступової заміни вітчизняного парку зношених трамвайних вагонів може вирішуватися трьома напрямками:

- придбанням нових моделей трамвайних вагонів вітчизняних виробників (оптимальний варіант);
- реконструкцією старих моделей трамвайних вагонів, які повністю вичерпали експлуатаційний ресурс, шляхом капітального

ремонт кузовів із застосуванням низькопідлогових секцій у їх середній частині та нових комплектувальних виробів, зокрема тягових електричних двигунів та систем керування тяговим приводом (допустимий проміжний варіант);

– придбанням трамвайних вагонів, які зняті з експлуатації у містах європейських країн (неприйнятний варіант для європейської країни).

Проте, у 2022 році з 34 трамвайних вагонів, отриманих вітчизняними підприємствами електричного транспорту всього 9 нових, тоді як вживаних аж 25, тобто 73,5 %.

За період з 2000-го року по 2022 рік лише у 4-х вітчизняних містах – Києві, Вінниці, Кривому Розі й Львові – були побудовані та введені в експлуатацію нові мережі трамвайних колій загальною довжиною 16,3 км.

Аналіз публікацій

Розвиток конструкцій сучасних багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів (ЗТВ) відбувається у кількох напрямках, пов'язаних, зокрема, із застосуванням систем модульного проектування для створення типорозмірних рядів на основі різних компоновальних схем за кількістю, типом і розміщенням колісних візків та пасажирських дверей.

Еволюція розвитку конструкцій трамвайних вагонів за критеріями кількості колісних візків, рівнів підлоги у пасажирських салонах та систем керування тяговими приводами [1-3] свідчить про те, що з 2000-х років одним із магістральних напрямків стало зменшення висоти і кількості рівнів підлоги та створення повністю низькопідлогових моделей. Відповідно до вимог ДСТУ 4876 до трамвайних вагонів з низьким розташуванням підлоги відносяться вагони, у яких щонайменше 35 % площі підлоги пасажирського салону, відведеного для розміщення пасажирів, які стоять, утворює суцільну поверхню без сходинок, на яку можна піднятися принаймні через одні службові двері, зробивши при цьому всього один крок із опорної поверхні. Саме тому, на нинішній час існують два напрямки створення низькопідлогових трамвайних вагонів, які передбачають:

– проектування вагонів з частково низьким рівнем підлоги, зазвичай, у середній частині пасажирських салонів одинарних або багатосекційних зчленованих вагонів;

– створення повністю низькопідлогових вагонів, тобто зі 100 % низьким рівнем підлоги (не вище 0,36 м) у пасажирських салонах всіх секцій вагона.

Огляд конструктивних рішень, які застосовуються при проектуванні низькопідлогових трамвайних одинарних та багатосекційних зчленованих вагонів наведені у роботах [4, 5]. Аналіз переваг та недоліків трамвайних вагонів з частково або повністю низьким рівнем підлоги у їх пасажирських салонах, наведений у роботах [6, 7], показує, що попри тендерні вимоги з придбання повністю низькопідлогових вагонів, вони далеко не однозначні, особливо, з огляду на витрати, пов'язані на проектування та дрібносерійне виробництво таких вагонів. Адже їх собівартість суттєво вища ніж трамвайних вагонів з частково низьким рівнем підлоги, тим паче за умови, що його частка сягає 70-80 %.

Огляд розвитку конструкцій трамвайних колісних візків, необхідних для застосування у ходовій частині повністю низькопідлогових вагонів, наведений у дослідженнях [8, 9]. Проблеми, пов'язані із застосуванням у ходових частинах трамвайних вагонів колісних візків з незалежною підвіскою коліс, наведені у дослідженні [10].

Рекомендації щодо проектування сучасних конструкцій трамвайних вагонів, зокрема вибір типу та довжини кузовів вагонів у залежності від їх номінальної пасажировмістимості, наведені у роботі [11].

Напрямок розвитку концептуального дизайну (екстер'єру) перспективного трамвайного вагона розглянутий у роботі [12].

Основні аспекти реконструкції та будівництва нових ліній трамвайних мереж проаналізовані у роботі [13], зокрема, акцентована доцільність застосування сучасних безбаластних конструкцій трамвайних колій.

Мета та постановка задачі

Мета роботи полягає у розробленні ескізного проекту модульно-уніфікованих типорозмірних рядів (ТРР) багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів на основі інноваційної компоновальної схеми та оцінці доцільності розроблення конструкцій їх нових перспективних і конкурентоспроможних моделей для освоєння виробництва на вітчизняних підприємствах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконання наступних задач:

- проведення аналізу конструкцій сучасних моделей багатосекційних ЗТВ;
- визначення компоувальних схем ЗТВ та їх основних недоліків;
- визначення визначальних критеріїв негативного впливу на планування пасажирських салонів ЗТВ;
- розроблення інноваційної компоувальної схеми багатосекційних ЗТВ на основі застосування теорії рішення винахідницьких задач (ТРВЗ);
- розроблення ескізного проекту ТРР модульно-уніфікованих ЗТВ на основі інноваційної компоувальної схеми;
- визначення параметрів мас та номінальної пасажиромістимості розроблених багатосекційних ЗТВ;
- формування критеріїв оцінки конструктивної та експлуатаційної ефективності ба-

гатосекційних ЗТВ на етапі ескізного проектування;

- проведення порівняльного аналізу експлуатаційної ефективності створених проєктів багатосекційних ЗТВ із застосуванням пропонованих критеріїв їх експлуатаційної ефективності.

Аналіз компоувальних схем зчленованих трамвайних вагонів

На основі огляду та аналізу конструкцій сучасних моделей багатосекційних ЗТВ за способом формування їх модульно-уніфікованих ТРР за довжиною і шириною вагонів та типом, кількістю та розміщенням колісних візків можна виділити три основні компоувальні схеми, за якими створена переважача більшість їх моделей (рис. 1):

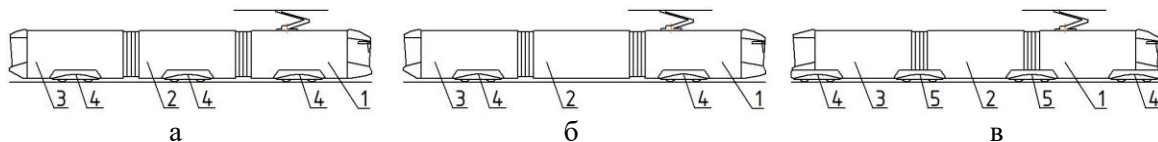


Рис. 1. Компоувальні схеми багатосекційних ЗТВ: а – послідовного типу; б – геометричного типу; в – проміжного типу (1 – секція передня з відділенням водія; 2 – проміжна секція; 3 – кінцева секція; 4 – двовісний колісний візок (неповоротний або поворотний); 5 – двовісний колісний візок Якобса)

- послідовного типу, у якій кожна секція ЗТВ обладнана одним двовісним колісним візком, розміщеним у її середній частині (рис. 2);

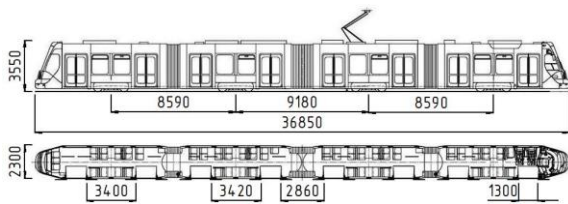


Рис. 2. Чотирисекційний ЗТВ моделі Siemens Avenio T1, створений на основі послідовної компоувальної схеми

- геометричного типу, у якій тільки непарні секції обладнані одним двовісним колісним візком, розміщеним у їх середній частині або наближеним до неї (рис. 3);
- проміжного типу, у якій передня і задня секції обладнані одним двовісним колісним візком, розміщеним в одному з їх кінців, та одним двовісним колісним візком Якобса, спільним для двох суміжних пасажирських секцій, який розміщений під секцією їх зчленування (рис. 4).

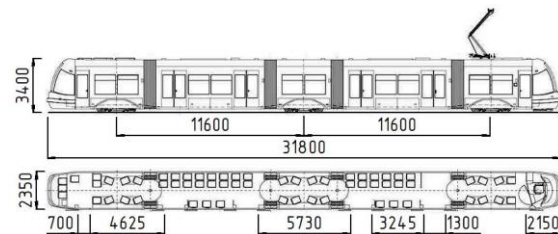


Рис. 3. П'ятисекційний ЗТВ моделі PESA 120N, створений на основі геометричної компоувальної схеми

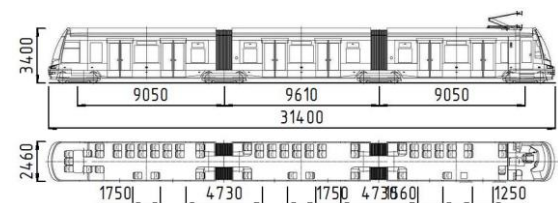


Рис. 4. Трисекційний ЗТВ моделі Skoda ForCity Alfa, створений на основі проміжної компоувальної схеми

Для створення багатосекційних ЗТВ застосовуються також комбіновані або змішані компоувальні схеми, за одним з варіантів яких спроектована модель Skoda ForCity Plus (рис. 5).

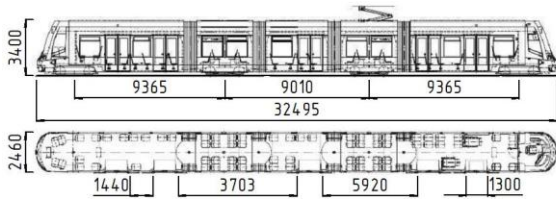


Рис. 5. П'ятисекційний ЗТВ моделі Skoda ForCity Plus, створений на основі комбінованої компоувальної схеми

Наведена компоувальна схема характерна наявністю і послідовної схеми – перша і друга та четверта і п'ята секції та геометричної схеми – друга, третя і четверта секції.

Для компоувальних схем багатосекційних ЗТВ з двовісними колісними візками властивий ряд суттєвих недоліків, які можна об'єднати у дві групи:

- група Е – недоліки, пов'язані з експлуатацією трамвайних вагонів;
- група К – недоліки, характерні для компоувань пасажирських салонів.

До основних експлуатаційних недоліків групи Е належать:

- підвищена зношуваність коліс візків та рейок трамвайних мереж, особливо у випадку застосування неповоротних двовісних колісних візків;
- підвищений рівень шуму від проковзування коліс візків на криволінійних ділянках трамвайних колій малого радіусу.

Основні недоліки групи К стосуються проблем компоувань і планувань пасажирських салонів вагонів:

- арки двовісних колісних візків з колісною базою 1,9-2,0 м займають багато площі пасажирських салонів у тих секціях, які ними обладнані;
- ширина проходу по пасажирських салонах вагонів обмежується великою шириною арок колісних візків, особливо поворотного типу, які під час руху по криволінійних ділянках рейкових шляхів з малим радіусом потребують ще більшої ширини колісних арок;
- застосуванню і оптимальному розмі-

щенню подвійних пасажирських дверей часто перешкоджає велика довжина колісних арок, розміщених не у середніх частинах секції ЗТВ;

– забезпечення низького рівня підлоги над візками зі спільною балкою кожної пари коліс не можливе, тому потребує застосування візків з незалежним рухом кожного їх колеса, що суттєво ускладнює конструкцію таких візків, тим паче поворотних.

Отже, застосування двовісних колісних візків являється джерелом ряду доволі вагомих проблем, усунення або мінімізація впливу яких на конструктивні та експлуатаційні параметри проєктованих багатосекційних ЗТВ потребує ускладнення їх конструкції шляхом застосування:

- неповоротних або поворотних візків з індивідуальним приводом коліс осей, розміщених з одного боку;
- неповоротних або поворотних візків типу ARW з індивідуальним приводом кожного колеса.

Проте, застосування таких колісних візків суттєво ускладнює їх конструкції та системи керування тяговим приводом.

Розроблення нової компоувальної схеми багатосекційних ЗТВ

Проведений аналіз компоувальних схем сучасних моделей багатосекційних ЗТВ показав, що основним джерелом багатьох конструктивних і експлуатаційних недоліків їх конструкцій являються двовісні колісні візки. Отже, на основі теорії рішення винахідницьких задач (ТРВЗ) можна виділити головне протиріччя компоувальних схем багатосекційних ЗТВ – у їх пасажирських салонах не повинно бути арок колісних візків, але мусять бути колісні візки, як основний комплектувальний виріб їх ходової частини та тягового приводу.

Графічна модель існуючого протиріччя (існуючої суперечності) в компоувальних схемах ЗТВ наведена на рис. 2.

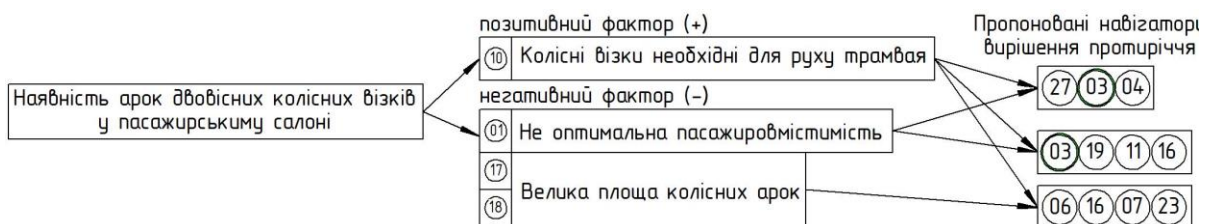


Рис. 6. Схема існуючого протиріччя у конструкціях ЗТВ і пропонувані навігатори для його усунення

Із наведених на схемі існуючого протиріччя у конструкціях ЗТВ пропонуваніх навігаторів ТРВЗ [14] для його усунення єдиним можливим для застосування являється навігатор "3" – "дроблення", який передбачає розділення об'єкта зі шкідливими факторами на незалежні частини. В даному випадку реалізація цього навігатора можлива у варіанті поділу одного тягового двовісного колісного візка на два тягових одновісних колісних візки.

Одновісні візки застосовувались на одинарних трамвайних вагонах, створених у першій половині 19-го століття. Проте, необхідність збільшення їх пасажиромістимості при регламентованій ширині вагонів потребувало збільшення їх довжини, що неминуче збільшувало і їх споряджену та повну конструктивну маси. А за умови регламентованої навантаги на одновісний колісний візок довелося збільшувати їх кількість у одинарних вагонах з двох до чотирьох. Таке вимушене рішення призвело до об'єднання двох одновісних колісних візків з метою зменшення колісних баз вагонів і появи їх двовісних варіантів.

Проте, одновісні колісні візки, щоправда умовні, оскільки два їх колеса обладнані незалежною підвіскою коліс з індивідуальним тяговим приводом, які розміщені у вертикальній ніші над колесами, все ж були застосовані у ходовій частині зчленованого трамвайного вагона моделі Siemens ULF [15],

створеного фахівцями міжнародного концерну Siemens AG ще у 1997 році (рис. 7).

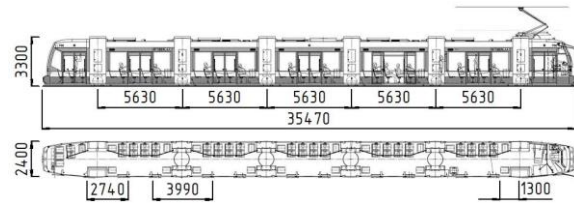


Рис. 7. Семисекційний ЗТВ моделі Siemens ULF, створений по оригінальній компоновальній схемі на основі одновісних колісних візків, якими обладнані передня і задня довгі секції та чотири шарнірно-з'єднувальні секції

Але їх конструкція виявилась надто складною та дорогою у виробництві й обслуговуванні, тому поширення не набула попри найнижчий рівень підлоги у пасажирському салоні – усього 0,197 м. Та все ж застосування одновісних колісних візків необхідне, але з горизонтальним розміщенням складових частин і з тяговим електричним двигуном для приводу кожного колеса. Отже виникає нове протиріччя, схема якого наведена на рис. 8, – колісні арки, яких, до того ж стало вдвічі більше, хоч і мусять бути у пасажирському салоні ЗТВ, але не мають перешкоджати його оптимальному плануванню.

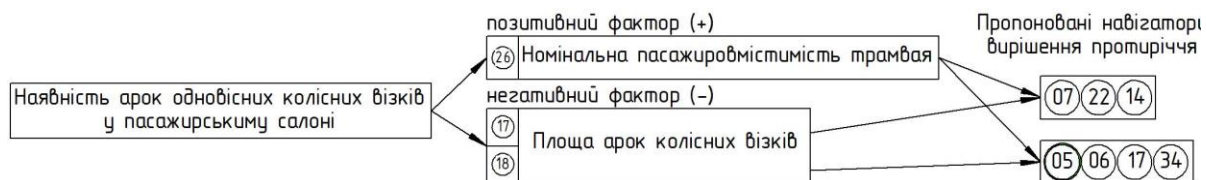


Рис. 8. Схема нового існуючого протиріччя у конструкціях ЗТВ і навігатори для його усунення

Із пропонуваніх навігаторів ТРВЗ для усунення розглянутого протиріччя єдиним можливим для застосування являється навігатор "5" – "винесення", який, у даному випадку, передбачає переміщення одновісних колісних візків із середніх частин секцій ЗТВ у їх обидва кінці.

Пропонована інноваційна компоновальна схема для створення нових моделей багатосекційних трамвайних вагонів наведена на рис. 9.

Розділення двовісних колісних візків на два одновісні та їх розміщення по краях пасажирських секцій забезпечує ряд переваг, серед яких:

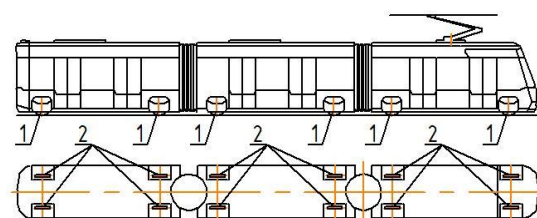


Рис. 9. Пропонована компоновальна схема для створення багатосекційних ЗТВ: 1 – одновісний колісний візок; 2 – колесо візка з індивідуальним тяговим двигуном

– суттєво менша площа колісних арок одинарних коліс, що забезпечує оптимальне розміщення пасажирських сидінь;

– велика вільна площа середніх частин пасажирських секцій та можливість застосування різних варіантів їх планувань;

– можливість розміщення двох подвійних пасажирських дверей у кожній секції для зручного і швидкого пасажирообміну.

Ще одна важлива перевага стосується поворотних колісних візків, адже одинарні колісні візки при повороті потребують меншої ширини колісних арок (рис. 10).

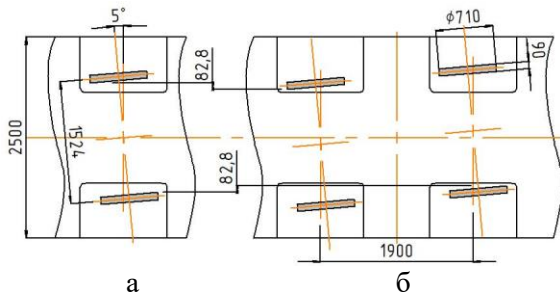


Рис. 10. Схема повороту колісних візків: а – одинарного; б – двовісного

Із наведеної схеми видно, що колеса одинарних поворотних візків з шириною колії 1,524 м і діаметром коліс 0,71 м при куті повороту усього 5 град. відхиляються від поздовжнього положення на 0,0828 м менше ніж колеса двовісних поворотних візків.

Розроблення проєктів багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів на основі запропонованої компоувальної схеми

Для оцінки доцільності створення багатосекційних ЗТВ на основі застосування запропонованої інноваційної компоувальної схеми з одинарними неповоротними колісними візками та проведення аналізу їх основних конструктивних і експлуатаційних параметрів розроблений ескізний проєкт модульно-уніфікованого типорозмірного ряду багатосекційних ЗТВ за наступних вихідних вимог (рис. 11):

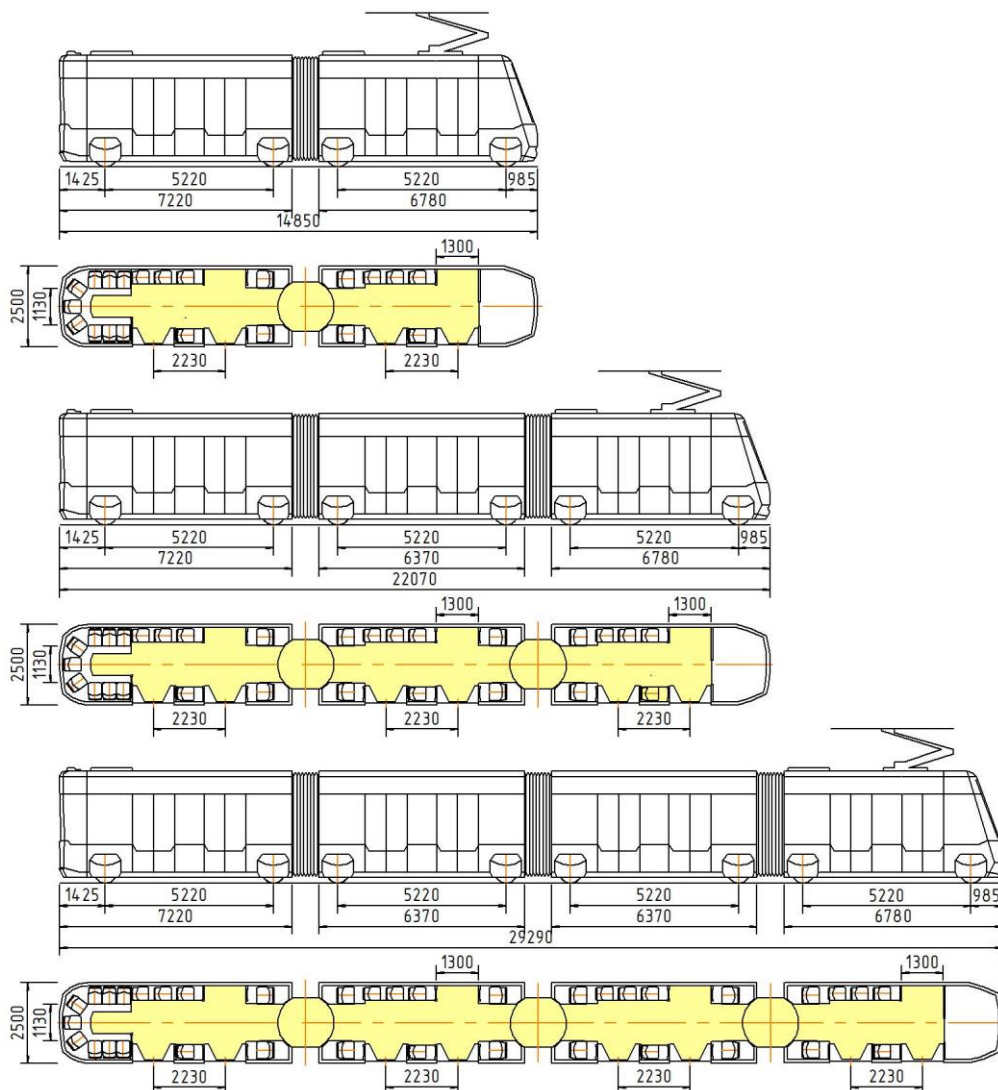


Рис. 11. Проєкт ТРР модульно-уніфікованих багатосекційних ЗТВ з одинарними візками

- тип трамвайних вагонів – однонаправлені з одним відділенням водія;
- кількість секцій у ЗТВ – дві, три та чотири;
- тип компоувальної схеми ЗТВ – послідовний;
- ширина кузовів – 2,5 м при колії коліс колісних візків 1,524 м;
- кількість і тип пасажирських дверей у кожній секції – двоє подвійних поворотних;
- тип планування пасажирських салонів – дворядне.

Розроблений проект передбачає три типорозмірні ряди модульно-уніфікованих багатосекційних ЗТВ, кожний з яких складається з трьох моделей вагонів – дво-, три- та чотирисекційних.

Показаний на рис. 11 ТРР багатосекційних ЗТВ відображає їх моделі з найкоротшими кузовами. Інші два ТРР передбачають застосування подовжених пасажирських секцій, відповідно, на 0,7 м та 1,4 м.

Таким чином, кожний типорозмірний ряд дво-, три- та чотирисекційних ЗТВ налічує три типорозміри по довжині. Такий ТРР двосекційних трамвайних вагонів показаний на рис. 12.

Характерними особливостями трамвайних вагонів розробленого ескізного проекту являються:

- можливість застосування дво-, три, чотирирядні варіанти планувань пасажирських салонів або будь-якого змішаного варіанту, що забезпечить будь-які потреби відповідно до інтенсивності пасажиропотоків на конкретних маршрутах;
- застосування рівновіддалених чотирьох, шести та восьми подвійних пасажирських дверей, що забезпечує зручний пасажиробмін під час зупинок;
- можливість облаштування широких накопичувальних майданчиків у необхідній кількості навпроти кожних пасажирських дверей;
- нівельований вплив арок колісного першого візка головної секції та другого візка кінцевої секції на розміщення пасажирських сидінь.

Варто також наголосити, що відстань між осями колісних візків, розміщених біля шарнірно-з'єднувальних секцій близька до колісної бази двовісних неповоротних візків і становить 2,0 м (для сучасних моделей багатосекційних ЗТВ колісна база візків рівна 1,7-1,9 м).

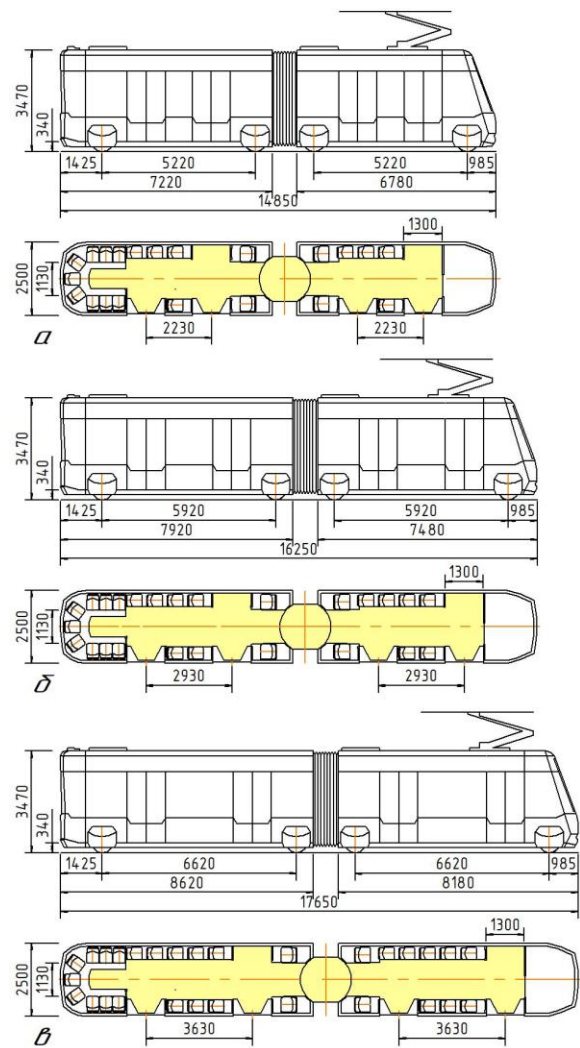


Рис. 12. Типорозмірний ряд двосекційних ЗТВ: а – проект АПП-сВ21; б – проект АПП-сВ22; в – проект АПП-сВ23

Окрім того, в зонах шарнірно-поворотних секцій встановлені сидіння, ширші на 0,12 м, на яких зручно розміщатись пасажиром з дітьми.

Визначення основних конструктивних і експлуатаційних параметрів ЗТВ

До основних конструктивних і експлуатаційних параметрів багатосекційних трамвайних вагонів, які підлягають аналізу на стадії розроблення ескізних проектів, відносяться:

- розмірні параметри кузовів – довжина і ширина;
- параметри мас – маса у спорядженому стані, допустима повна маса та повна конструктивна маса;
- параметри пасажиромістимості – кількість пасажирських сидінь, кількість облаштованих місць для розміщення пасажирів

у кріслах-колясках, кількість пасажирів, які перевозяться стоячи, номінальна пасажиромістимість.

Ширина кузовів більшості сучасних моделей багатосекційних трамвайних вагонів, зазвичай, становить 2,3 м, 2,5 м або 2,65 м. Відповідно вимогам ДСТУ 4070 для вагонів з шириною колії колісних візків 1,524 м ширина вагона не повинна перевищувати 2,5 м.

Довжина секцій ЗТВ повинна забезпечувати рух по криволінійних ділянках з радіусом 20,0 м, при цьому найбільш виступаючі точки кузова повинні описувати коло радіусом:

- з зовнішньої сторони кривої – не більше 21,8 м;
- з внутрішньої сторони кривої – не менше 18,4 м.

Довжина досліджуваних багатосекційних ЗТВ розроблених типорозмірів визначена з урахуванням наведених вище обмежень графічним способом для проєктів АПП-сВ21, АПП-сВ31 і АПП-сВ41 (рис. 11) та розрахунковим методом для більших типорозмірів:

$$L_{ki} = L_{k\delta} + 0,7n_{nc}, \quad (1)$$

де $L_{k\delta}$ – довжина кузова базового (попереднього) типорозміру вагона, м; n_{nc} – кількість пасажирських секцій у вагоні, од.

Допустима повна маса багатосекційних трамвайних вагонів обмежується допустимою навантагою на одну вісь колісного візка, яка відповідно до вимог ДСТУ 4876 [17] складає не більше 80000 Н (80 кН), визначається за кількістю осей колісних візків:

$$[M_n] = \frac{[G_{ko}]}{g} \cdot n_{ko}, \quad (2)$$

де $[G_{ko}]$ – допустима навантага на одну вісь колісного візка, кН; n_{ko} – кількість осей у колісних візках, од.; g – прискорення вільного падіння тіл, м/с².

Отже, допустима повна маса багатосекційних ЗТВ становить:

- двосекційних з чотирма колісними осями – $[M_n] = 32630$ кг;
- трисекційних з шістьма колісними осями – $[M_n] = 48945$ кг;
- чотирисекційних з вісьмома колісними осями – $[M_n] = 65260$ кг.

Споряджена маса багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів визначається за виразом [16]:

$$M_{cn} = \Delta m^s \cdot L_k \cdot B_k, \quad (1)$$

де Δm^s – питома маса спорядженого ЗТВ за площею кузова, кг/м²; L_k і B_k – відповідно, довжина і ширина вагона, м.

Для багатосекційних ЗТВ рекомендована величина $\Delta m^s = 525 \pm 10$ кг/м² (для розрахунків прийнято $\Delta m^s = 525$ кг/м²).

Номінальна пасажиромістимість трамвайних вагонів обмежується двома параметрами:

- допустимою повною конструктивною масою;
- площею пасажирського салону, призначеного для розміщення пасажирських сидінь, пасажирів у кріслах-колясках та пасажирів у стоячому положенні.

Номінальна вмістимість, обмежена допустимою повною масою трамвайних вагонів, визначається за виразом:

$$N_n^m = \frac{[M_n] - (M_{cn} + m_{вод})}{m_{nac}}, \quad (3)$$

де $m_{вод}$ – маса водія, кг ($m_{вод} = 75$ кг); m_{nac} – розрахункова маса одного пасажиря, кг ($m_{nac} = 68$ кг).

Номінальна вмістимість, обмежена площею пасажирського салону, визначається за виразом:

$$N_n^s = n_{сид} + n_{кк} + \frac{S_{cm}}{\Delta n^s}, \quad (4)$$

де $n_{сид}$ – кількість пасажирів, розміщених на пасажирських сидіннях, чол.; $n_{кк}$ – кількість пасажирів, що перевозяться у кріслах-колясках, чол.; S_{cm} – площа пасажирського салону, призначена для розміщення пасажирів у стоячому положенні, м²; Δn^s – питома норма стоячих пасажирів, чол./м² (приймається $\Delta n^s = 8$ чол./м²).

Розрахункові розмірні параметри, параметри мас та номінальної пасажиромістимості пропонує багатосекційних ЗТВ наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри багатосекційних трамвайних вагонів розробленого ТРР

Позначка проекту трамвайного вагона	сВ21	сВ22	сВ23	сВ31	сВ32	сВ33	сВ41	сВ42	сВ43
Тип вагона за кількістю секцій	двосекційний			трисекційний			чотирисекційний		
Розмірні параметри по кузову, м:									
- довжина, L_k	14,85	16,25	17,65	22,07	24,17	26,27	29,29	32,09	34,89
- ширина, B_k	2,5								
Параметри мас, кг:									
- допустима повна маса	32630			48945			65260		
- споряджена маса	19490	21330	23165	28965	31725	34480	38445	42120	45795
Номінальна вмістимість, чол.:									
- за допустимою повною масою, N_n^m	192	165	138	293	252	212	393	339	285
- кількість пасажирів на сидіннях	21	25	29	29	35	41	37	45	53
Площа пасажирського салону для розміщення стоячих пасажирів, m^2									
	17,90	19,84	21,77	28,73	31,62	34,52	39,55	43,42	47,28
Номінальна вмістимість, чол.:									
- за площею підлоги салону, N_n^s	164	184	204	259	288	317	349	388	427
- кількість стоячих пасажирів	143	159	175	230	253	276	312	343	374
Номінальна вмістимість, N_n , чол.									
	164	165	138	259	252	212	349	339	285

Аналіз параметрів пасажировмістимості пропонуваніх ТРР модульно-уніфікованих дво-, три- та чотирисекційних ЗТВ (табл. 1 та рис. 13) показав, що:

– визначальними обмежувальними параметрами вмістимості трамвайних вагонів яв-

ляються їх маса у спорядженому стані та допустима повна маса, яка залежить від кількості осей колісних візків;

– зі збільшенням довжини кузовів вагонів їх питома вмістимість при ширині кузовів 2,5 м зменшується на 19-20 чол./м.

Номінальна вмістимість, N_n , чол.

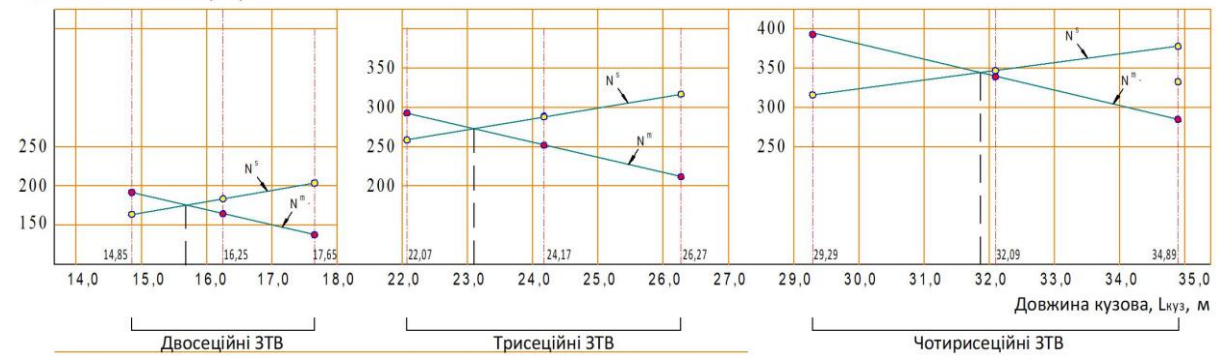


Рис. 13. Вплив довжини багатосекційних трамвайних вагонів на номінальну вмістимість

Отже, у процесі проектування багатосекційних ЗТВ особлива увага повинна приділятися оптимізації їх розмірних параметрів та параметрів мас та пасажировмістимості.

Аналіз конструктивної та експлуатаційної ефективності трамвайних вагонів

Для оцінки конструктивної та експлуатаційної ефективності модульно-уніфікованих багатосекційних ЗТВ на стадії розроблення ескізних проектів пропонуються наступні критерії:

– коефіцієнт ефективності пасажирських дверей;

– коефіцієнт зручності користування пасажирськими дверима;

– коефіцієнт експлуатаційної ефективності.

Коефіцієнт ефективності пасажирських дверей враховує їх кількість, тип і ширину в просявіті, встановлених в усіх секціях трамвайного вагона, по відношенню до довжини його кузова:

$$k_{ef}^{de} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{de_i}}{L_k}, \quad (5)$$

де $\sum_{i=1}^n l_{\partial\sigma i}$ – сумарна ширина пасажирських дверей у провітрі, м.

Коефіцієнт зручності користування пасажирськими дверима враховує їх кількість та середню відстань між суміжними дверима:

$$k_{зк}^{\partial\sigma} = \frac{k_p \cdot N_n \cdot (n_{\partial\sigma} - 1)}{\sum_{i=1}^{n-1} l_{с\partial\sigma i}}, \quad (6)$$

де k_p – розмірний коефіцієнт, м/чол.,

$\sum_{i=1}^{n-1} l_{с\partial\sigma i}$ – сумарна відстань між суміжними

пасажирськими дверима, м.

Коефіцієнт експлуатаційної ефективності багатосекційних ЗТВ враховує номінальну вмістимість, кількість колісних осей у колісних візках, повну конструктивну масу та довжину кузова і визначається за виразом:

$$k_{еef}^m = \frac{10^3 k_p \cdot N_n \cdot \sum n_{окв}}{L_k \cdot [M_n]}, \quad (7)$$

де k_p – розмірний коефіцієнт, м·кг/чол.,

$\sum n_{окв}$ – кількість осей у всіх колісних візках трамвайного вагона, од.

Якщо виробником багатосекційного ЗТВ не наведені параметри спорядженої або повної конструктивної маси коефіцієнт експлуатаційної ефективності визначається за таким виразом:

$$k_{еef}^n = 1 + \frac{N_n}{L_k \cdot \Delta n^s \cdot \sum n_{окв}}. \quad (8)$$

Розрахункові величини запропонованих коефіцієнтів конструктивної та експлуатаційної ефективності розробленого ескізного проекту типорозмірних рядів модульно-уніфікованих трамвайних вагонів наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти ефективності багатосекційних трамвайних вагонів розробленого ТРР

Позначка проекту трамвайного вагона	сВ21	сВ22	сВ23	сВ31	сВ32	сВ33	сВ41	сВ42	сВ43
Тип вагона за кількістю секцій	двосекційний			трисекційний			чотирисекційний		
Довжина вагона, L_k , м	14,85	16,25	17,65	22,07	24,17	26,27	29,29	32,09	34,89
Допустима повна маса, $[M_n]$, кг	32630			48945			65260		
Номінальна вмістимість, N_n , чол.	164	165	138	259	252	212	349	339	285
Ширина пасажирських дверей у провітрі, $\sum_{i=1}^n l_{\partial\sigma i}$, м	4,8			7,2			9,6		
Відстань між суміжними пасажирськими дверима, $\sum_{i=1}^{n-1} l_{с\partial\sigma i}$, м	3,525	6,925	8,325	10,136	12,236	24,336	14,747	17,547	20,347
Коефіцієнт ефективності пасажирських дверей, $k_{еef}^{\partial\sigma}$	0,323	0,295	0,272	0,326	0,298	0,274	0,328	0,299	0,275
Коефіцієнт зручності користування пасажирськими дверима, $k_{зк}^{\partial\sigma}$	0,297	0,238	0,166	0,256	0,206	0,121	0,237	0,193	0,141
Коефіцієнти експлуатаційної ефективності трамвайних вагонів:									
$k_{еef}^m$	1,354	1,245	0,958	1,439	1,278	0,989	1,461	1,295	1,001
$k_{еef}^n$	1,345	1,317	1,244	1,244	1,217	1,168	1,186	1,165	1,128

Аналіз величин коефіцієнтів конструктивної та експлуатаційної ефективності дво-, три- та чотирисекційних ЗТВ показує, що найвищі значення коефіцієнтів ефективності й зручності користування пасажирськими

дверима та експлуатаційної ефективності мають найменші їх типорозміри.

Отже, подальшому дослідженню підлягають трамвайні вагони з позначками АПП-сВ21, АПП-сВ31 та АПП-сВ41.

Оцінка доцільності освоєння виробництва трамвайних вагонів на основі інноваційної компоувальної схеми

Для оцінки доцільності створення і освоєння виробництва багатосекційних ЗТВ пропонуваного ТРР на основі порівняння їх основних експлуатаційних параметрів з параметрами сучасних моделей за такими умовами:

- тип вагонів – однонаправлені;
- тип компоувальної схеми вагонів – послідовна, геометрична або комбінована;
- тип за рівнем підлоги – повністю низькопідлогові;
- ширина кузовів вагонів – 2,5 м;
- номінальна вмістимість – близька до вмістимості пропонуванних ЗТВ (допустиме відхилення ±10 чол.);
- довжина кузова близька до пропонуванного типорозміру (відхилення ±2 м).

На основі вказаних вище умов для порів-

няльної оцінки багатосекційних ЗТВ вибрані наступні моделі:

- "Електрон ТЗВ44" – трисекційний вагон геометричної компоувальної схеми (за вмістимістю);
- "Електрон Т5В64" – п'ятисекційний вагон геометричної компоувальної схеми – за довжиною;
- Stadler В82202 – двосекційний вагон послідовної компоувальної схеми (за довжиною);
- Skoda ForCity Smart – двосекційний вагон комбінованої компоувальної схеми (за вмістимістю);
- Skoda ForCity Alfa – трисекційний вагон геометричної компоувальної схеми (за кількістю пасажиромісць).

Розрахункові коефіцієнти експлуатаційної ефективності порівнюванних багатосекційних ЗТВ наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти експлуатаційної ефективності багатосекційних трамвайних вагонів

Познака вагона	АПП-сВ21	Електрон Т344	ForCity Smart	АПП-сВ31	Stadler В82202	АПП-сВ41	Електрон Т564	Skoda ForCity Alfa
Тип компоувальної схеми	П	Г	К	П	П	П	Г	К
Кількість секцій, од.	2	3	2	3	2	4	5	3
Кількість осей колісних візків, од.	4		6		4	8	6	8
Довжина вагона, L_k , м	14,85	19,5	26,64	22,07	20,346	29,29	30,2	31,4
Ширина вагона, B_k , м	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Повна маса, M_n , кг	32630	38300	-	48945	36750	65260	57415	-
Номінальна вмістимість, N_n , чол.	164	174	172	259	205	349	287	318
Питома норма стоячих пасажирів, Δn^s , чол./м	8		4	8				
Коефіцієнти експлуатаційної ефективності трамвайних вагонів:								
k_{eff}^m	1,354	0,932	-	1,439	1,097	1,461	0,993	-
k_{eff}^n	1,345	1,279	1,269	1,244	1,315	1,186	1,198	1,158

Примітки: П, Г і К – компоувальна схема, відповідно, послідовного, геометричного і комбінованого типу

Оцінка розрахункових величин коефіцієнтів експлуатаційної ефективності багатосекційних ЗТВ показала, що:

- коефіцієнт експлуатаційної ефективності трамвайних вагонів, визначений за виразом (7) з урахуванням повної конструктивної маси, придатний для коректного порівняння ЗТВ, створених за різними компоувальними схемами;
- коефіцієнт експлуатаційної ефективності трамвайних вагонів, визначений за виразом (8) без урахування повної конструктивної маси, може використовуватись для адек-

ватного порівняння їх конструкцій, створених за однаковими компоувальними схемами.

Висновки

На основі аналізу основних компоувальних схем багатосекційних ЗТВ були встановлені їх основні типи та визначені характерні недоліки. Вирішення завдань з їх усунення або мінімізації впливу на планування пасажирських салонів трамвайних вагонів з використанням теорії рішення винахідницьких задач бу-

ла розроблена інноваційна компоновальна схема на основі застосування одновісних колісних візків неповоротного та/ або поворотного типів.

Аналіз розрахункових величин коефіцієнтів експлуатаційної ефективності розробленого ескізного проєкту дво-, три- та чотири-секційних ЗТВ трьох типорозмірних рядів показав, що:

– за коефіцієнтом експлуатаційної ефективності $k_{еef}^m$ з урахування повної конструктивної маси трамвайні вагони ТРР на базі найкоротшого типорозміру (АПП-сВ21) перевищують трамвайні вагони близької вмістимості на 45,3% (моделі АПП-сВ21 і "Електрон ТЗВ44") та близької довжини на 31,2% (моделі АПП-сВ31 і Stadler В82202) і на 47,1% (моделі АПП-сВ41 та "Електрон Т5В64");

– за коефіцієнтом експлуатаційної ефективності $k_{еef}^m$ усі типорозміри наступного ТРР – АПП-сВ22, АПП-сВ32 теж ефективніші за порівнювані моделі, відповідно, на 33,6%, 16,0% та 30,4%.

Отже, розроблена компоновальна схема на основі застосування одновісних колісних візків неповоротного та поворотного типів видається доцільною для створення і освоєння виробництва на вітчизняних підприємствах перспективних конкурентоспроможних багатосекційних ЗТВ.

Проведення подальших досліджень передбачає розроблення і аналіз конструктивної та експлуатаційної ефективності багатосекційних ЗТВ на основі застосування пропонуваної компоновальної схеми:

– з одновісними колісними візками поворотного типу;
– з шириною кузовів 2,3 м для застосування на рейкових шляхах з колією 1,0 м.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Megna, G. & Bracciali, A. (2022). Technical Comparison of Commercially Available Trams and Review of Standardization Frame and Design Principles. *Urban Rail Transit*, 8, 16–31. <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00163-6>
2. Viganò, S. (2010). Pavimento tutto basso, ne vale sempre la pena? tram e trasporto pubblico a

Roma.

<http://www.tramroma.com/common/letteratura/docs/vigano.htm> [in Italy]

3. Hondius, H. (1993). The development of low-floor trams. *Journal of Advanced Transportation*, 27(1), 79–102. <https://doi.org/10.1002/atr.5670270108>
4. Vorobyev, A. A., Budyukin, A. M., & Kondratenko V. G. (2021). Analysis of current technical solutions applied in the design of low-floor tram cars. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 18(1), 7-15. DOI: <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2021-1-7-15>
5. Chudzikiewicz, A., Maciejewski, I., Krzyzyski, T., Krzyszkowski, A. & Stelmach A. (2022). Electric Drive Solution for Low-Floor City Transport Trams. *Energies*, 15, 4640, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134640>
6. Megna, G. & Bracciali, A. (2022). Technical Comparison of Commercially Available Trams and Review of Standardization Frame and Design Principles. *Urban Rail Transit*, 8(1), 16-31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00163-6>
7. Von Rohr, J. (1992). Low-Floor Light Rail Vehicle Development in Europe. *Transportation research record*, 1361, 287-295. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1361/1361-009.pdf>
8. Kolař, J. (2015). Design of a Wheelset Drive. *Transactions on Electrical Engineering*, 4(1), 11-19.
9. Jeong, N-T., Wang, M., Yoo, S., Kim, W-K., Han, S-Y., Lee, H.-Y. & Suh M-W. (2017). Conceptual design of high-speed semi-low-floor bogie for train-tram. *International Journal of Automotive Technology*, 18(3), 523-533.
10. Chudzikiewicz, A. & Sowiński, B. (2015). Modelling and simulation of trams bogies with fully independently rotating wheels. Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks: Proceedings of the 24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD 2015), August 17-21 2015, Graz, Austria. 9. URL: <http://repo.pw.edu.pl/info/article/WUT34d479885273414f80293c541cfb8d90/>
11. Smatlak, J. (2012). Development of Guidelines for Modern Streetcar Vehicles. URL: <http://reconnectingamerica.org/assets/Uploads/20120906SmatlakLRTConferencePaper.pdf>
12. Orekhov, V. V. & Abbasov, I. B. Conceptual Modeling of a Tramcar. (2021). *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 10 (4), 1115-1121. DOI: <https://doi.org/10.21275/SR21423131328>
13. Palant O., Dzhabrailov A. (2021). Economic advantages of the construction structure of tram lines. *Economic scope*, 171, 42-46. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/171-7>
14. Орлов М. А. Основы классической ТРИЗ.

- Практическое руководство для изобретательного мышления. М. : СОЛОН-ПРЕСС. 2006. 432 с. Orlov M. A. Osnovi klassicheskoi TRIZ. Prakti-cheskoe rukovodstvo dlya izobretatel'nogo mishleniya. [Orlov M. A. Basics of classical TRIZ. A practical guide for inventive thinking.] М. : SOLON-PRESS. 2006. 432 s. [in Russia].
15. Siemens. Tram System – ULF Vienna, Austria. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:bab137c522d71edd55d4aafaf7e50f07656ba37a/ulf-brochure-en.pdf>
16. Войтків С. В. (2023). Визначення параметрів мас трамвайних вагонів на етапі розроблення ескізних пропозицій. *Матеріали ЛІІ наук.-техн. конф. підр. Вінницького Нац. техн. ун-ту (НТКП ВНТУ–2023) : зб. доп. Вінниця : ВНТУ, 2023. С. 2731-2735. Voitkiv S. V. (2023). Vyznachennia parametriv mas tramvaynykh vahoniv na etapi rozroblennia eskiznykh propozytzii. *Materialy LII nauk.-tekh. konf. pidr. Vinnytskoho Nats. tekh. uni-tu (NTKP VNTU–2023) : zb. dop. [Value of parameters of tram cars at the stage of breaking down draft propositions]. Vinnytsia : VNTU, 2023. S. 2731-2735. [in Ukrainian].**

Войтків Станіслав Володимирович¹, к.т.н., генеральний конструктор, Заслужений машинобудівник України, тел. +38 067-447-04-90, voytkivsv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2081>

¹Науково-технічний центр "Автополіпром", 79066, Україна, м. Львів, вул. Зубрівська, 32/24.

The project of multi-section articulated tram cars based on an innovative layout scheme

Abstract. Problem. Tram transport refers to ecological types of passenger vehicles for public use. Therefore, it is quite widely used in many countries of the world, in particular, in 22 domestic cities. However, the current state of the fleet of its rolling stock is far from desirable because, with 2314 units as of January 2020, only 99 can be considered new, and a total of 2004 cars were in operation for less than 15 years. The total wear and tear of the fleet of tram cars has reached as much as 92.2%. Therefore, it is extremely necessary to update the rolling stock of tram transport with new competitive models in the ideal version of only domestic production as soon as possible. **Goal.** The purpose of the research is to develop a new innovative layout scheme and, based on its application, a sketch project of a modular-

*unified standard size series of two-, three- and four-section articulated tram cars, as well as an assessment of the feasibility of creating their structures for mastering production at domestic enterprises. **Methodology.** The development of a new layout scheme of multi-section articulated tram cars is based on the analysis of the layout schemes of modern models of such vehicles, the identification of their main types, and the determination of the main shortcomings associated with the main design and operational parameters of tram cars—dimensional parameters, mass parameters, and nominal passenger capacity, as well as the layouts of their passenger cabins. The expediency of using the proposed layout scheme for the creation of prospective models of tram cars was evaluated on the basis of the coefficients of their constructive and operational efficiency. **Results.** The developed project of multi-section articulated tram cars confirmed the possibility of applying the proposed innovative layout scheme to create promising and competitive models of tram cars with significantly higher indicators of operational efficiency. The use of single-axle wheeled trolleys provides the possibility of achieving faster passenger exchange at stops, and the organization of more convenient movement of passengers through passenger cabins and their access to passenger doors. **Originality.** A new innovative layout scheme was developed for the creation of competitive multi-section articulated tram cars. Indicators of their constructive and operational efficiency have been proposed at the stage of developing draft proposals and draft design. **Practical value.** The developed innovative layout scheme can serve to create new promising and competitive models of urban tram transport rolling stock. The proposed indicators of constructive and operational efficiency of tram cars can be utilized by specialists of project organizations at the stages of developing draft proposals and the stage of draft design.*

Key words: urban electric transport, articulated tram car, innovative layout scheme, nominal passenger capacity, coefficient of operational efficiency.

Voytkiv Stanislav¹, Cand. of Science, General Designer, Honored machine builder of Ukraine, тел. +38 067-447-04-90, voytkivsv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2081>

¹Scientific and technical Center "Autopoliprom", 32/24, Zubrivska, str., Lviv, 79066, Ukraine.