

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.433:658.589

С. В. ВОЙТКІВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Науково-технічний центр «Автополіпром», вул. Зубрівська, 32/24, Львів, Україна, 79066, тел. +38 (067) 447 04 90, ел. пошта voytkivsv@ukr.net, ORCID 0000-0002-7789-2081

## Розроблення й аналіз інноваційної компоувальної схеми зчленованого двосекційного трамвайного вагона

**Мета.** Основною метою роботи є розроблення та аналіз оптимальної компоувальної схеми зчленованого двосекційного трамвайного вагона для створення перспективних конкурентоспроможних моделей вагонів суттєво вищого технічного рівня, а також оцінка перспективності освоєння їх серійного виробництва за умови забезпечення максимальної пасажировмісності. **Методика.** На основі аналізу регламентованих технічних вимог до розмірних параметрів трамвайних вагонів, параметрів маневреності та допустимих навантаж на їх колісні візки, а також на основі аналізу основних технічних параметрів наявних моделей одинарних та двосекційних трамвайних вагонів, обладнаних двома двовісними колісними візками, – довжини кузовів та споряджених мас, визначено допустиму довжину їх кузовів та розрахункову масу у спорядженому стані. Два двовісні колісні візки замінено чотирма одновісними візками. **Результати.** Запропоновано й розроблено інноваційну компоувальну схему зчленованого двосекційного трамвайного вагона на основі застосування чотирьох одновісних колісних візків та мінімізації звисів секцій кузовів за умови збереження отриманої максимальної довжини одинарного трамвайного вагона та колії колісних візків і ширини вагона. Розроблено методику оцінки ефективності запропонованих конструктивних рішень та комфортабельності перевезень пасажирів одинарними та двосекційними трамвайними вагонами з двома двовісними та чотирма одновісними колісними візками, ескізні проекти яких розроблено за трьома різними компоувальними схемами. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано компоувальну схему зчленованого двосекційного трамвайного вагона на основі інноваційного рішення – застосування замість двох двовісних колісних візків чотирьох одновісних. Розроблено методику проведення аналізу та оцінки доцільності застосування запропонованої компоувальної схеми для створення перспективних моделей двосекційного трамвайного вагона. **Практична значимість.** Обгрунтовано вибір уже на стадії розроблення ескізних пропозицій оптимальної інноваційної компоувальної схеми з чотирма одновісними колісними візками для створення перспективних конкурентоспроможних моделей зчленованих двосекційних трамвайних вагонів з оптимізованими параметрами довжини їх кузовів та номінальної пасажировмісності з вищою комфортабельністю перевезень пасажирів порівняно з наявними трамвайними вагонами-аналогами.

**Ключові слова:** двосекційний трамвайний вагон; компоувальна схема; колісний візок; розмірні параметри вагона; конструктивна досконалість вагонів; конкурентоспроможність трамвайних вагонів

### Вступ

Трамвай є одним із видів екологічно чистого міського транспорту громадського користування, тому його доволі широко застосовують у багатьох країнах світу, зокрема й у 22 вітчизняних містах. Довжина трамвайних колій у цих

містах становить понад 2 000 км, а щорічний обсяг перевезень сягає 3 млрд пасажирів.

Проте розвиток вітчизняного трамвайного транспорту, зокрема оновлення рухомого складу, відбувається вкрай повільно і супроводжується низкою суттєвих недоліків, серед яких:

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

– велика частка парку трамвайних вагонів вичерпала встановлений експлуатаційний ресурс – не більше 15 років;

– велику частку складають вагони застарілих моделей, конструкції яких характеризуються високим рівнем підлоги у пасажирських приміщеннях;

– незадовільний стан більшості трамвайних колій та контактних електричних мереж.

Станом на 01 січня 2022 року вітчизняний парк пасажирських трамвайних вагонів складав 2 314 од., з яких лише 99 можна вважати новими й такими, які відповідають сучасним вимогам до перевезень пасажирів. Окрім того, лише 204 вагони перебували в експлуатації менше 15 років. Загальна зношеність усього парку трамвайних вагонів станом на початок 2021 року сягала 92,2 %.

Проблему поступової заміни вітчизняного парку зношених трамвайних вагонів можна вирішувати за трьома напрямками:

– придбання нових моделей трамвайних вагонів вітчизняних виробників (оптимальний варіант);

– реконструкція старих моделей трамвайних вагонів, які повністю вичерпали експлуатаційний ресурс, шляхом капітального ремонту кузовів із застосуванням низькопідлогових секцій у їх середній частині та нових комплектувальних виробів, зокрема тягових електричних двигунів та систем керування тяговим приводом (допустимий варіант);

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

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

За період із 2000 року по нинішній час лише у 4 вітчизняних містах – Києві, Вінниці, Кривому Розі та Львові – були побудовані та введені в експлуатацію нові мережі трамвайних колій загальною довжиною 16,3 км.

Розвиток конструкцій сучасних трамвайних вагонів відбувається в кількох напрямках, пов'язаних із будовою вагонів і плануванням їх пасажирських салонів, із будовою окремих складових частин, зокрема колісних візків, тягових електричних двигунів тощо, а також із застосуванням різних компоновальних схем за

кількістю, типом і розміщенням колісних візків і пасажирських дверей.

Одним із магістральних напрямів розвитку конструкцій трамвайних вагонів є забезпечення низького рівня підлоги в пасажирських салонах. Відповідно до вимог ДСТУ 4876 [2], до трамвайних вагонів із низьким розташуванням підлоги належать 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 землі. Саме тому нині існують два напрями створення низькопідлогових трамвайних вагонів, які передбачають:

– проектування вагонів із частково низьким рівнем підлоги, зазвичай, у середній частині пасажирських салонів одинарних чи двосекційних вагонів або в середніх секціях трисекційних вагонів;

– створення повністю низькопідлогових вагонів, тобто зі стовідсотковим низьким рівнем підлоги у пасажирських салонах.

Еволюція конструкцій трамвайних вагонів за критеріями кількості колісних візків, рівнів підлоги у пасажирських салонах та систем керування тяговими приводами показана в роботі [8]. Огляд конструктивних рішень, які застосовуються під час проектування низькопідлогових трамвайних вагонів, наведено в роботі [4]. Аналіз переваг та недоліків трамвайних вагонів із частково або повністю низьким рівнем підлоги в пасажирських салонах, проведений у роботах [9, 12], показує, що, попри тендерні вимоги щодо закупівель повністю низькопідлогових вагонів, вони далеко не однозначні, особливо з огляду на витрати на проектування та дрібносерійне виробництво таких вагонів. Адже їх собівартість суттєво вища за собівартість трамвайних вагонів із частково низьким рівнем підлоги, навіть за умови, що його частка сягає 70–80 %.

Розвиток конструкцій трамвайних колісних візків для низькопідлогових вагонів наведено в дослідженнях [6, 7].

Рекомендації щодо проектування сучасних конструкцій трамвайних вагонів, зокрема вибір типу та довжини кузова залежно від номінальної пасажиромістності, подано в роботі [11]. Проблеми, пов'язані із застосуванням у ходових

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

частинах трамвайних вагонів колісних візків із незалежною підвіскою коліс, досліджено у [5].

Напрямок розвитку концептуального дизайну (екстер'єру) перспективного трамвайного вагона розглянуто в роботі [10].

Основні аспекти реконструкції та будівництва нових трамвайних ліній проаналізовано в роботі [3], зокрема, акцентовано на доцільності застосування сучасних безбаластових конструкцій трамвайних колій.

### Мета

Основною метою роботи є розроблення та аналіз інноваційної компоувальної схеми трамвайного зчленованого двосекційного вагона на основі застосування замість двох двовісних колісних візків чотирьох одновісних, а також оцінка доцільності створення на її базі перспек-

тивних конкурентоспроможних моделей трамвайних вагонів із вищим рівнем комфортабельності та освоєння їх серійного виробництва за умови забезпечення максимальної місткості.

### Методика

Огляд сучасних трамвайних вагонів показує, що в конструкціях ходових частин одинарних та деяких моделей зчленованих двосекційних вагонів застосовують два двовісні колісні візки поворотного типу, наприклад, у частково низькопідлогових одинарних вагонах моделі «Vario LF» виробництва чеської компанії «Skoda Elctric a.s.» (рис. 1, *а*) або у зчленованих двосекційних повністю низькопідлогових вагонах моделі «Stadler 82202» виробництва швейцарської фірми «Stadler Rail AG» (рис. 1, *б*).

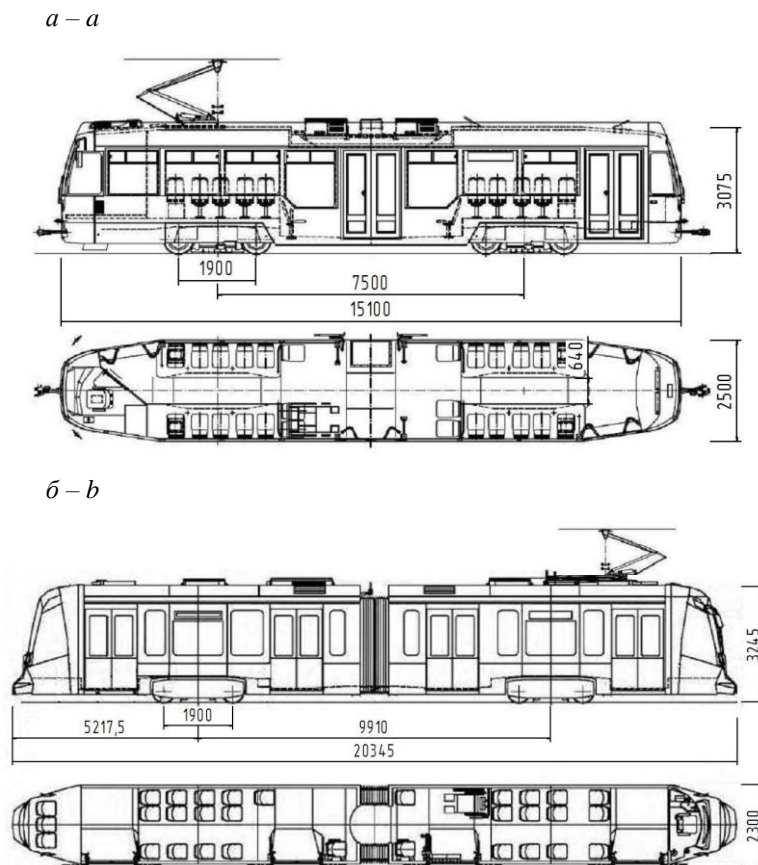


Рис. 1. Компоувальні схеми трамвайних вагонів, обладнаних двома двовісними колісними візками:  
*а* – одинарний моделі «Vario LF»; *б* – двосекційний моделі «Stadler 82202»

Fig. 1. Layout diagrams of tramcars equipped with two biaxial wheeled bogies:  
*a* – single model «Vario LF»; *b* – two-section model «Stadler 82202»

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Основні технічні параметри трамвайних вагонів моделей «Vario LF» та «Stadler 82202» наведено в табл. 1.

Таблиця 1

## Основні технічні параметри трамвайних вагонів

Table 1

## Main technical parameters of tram cars

Модель вагона	«Vario LF»	«Stadler 82202»
Розмір кузова, м:		
– довжина	15,1	20,345
– ширина	2,5	2,3
Номінальна пасажировмісність, чол.		
– за норми 5 чол./м <sup>2</sup>	105	–
– за норми 8 чол./м <sup>2</sup>	–	200
– кількість одинарних сидінь	24	31
Маса спорядженого вагона, кг	21 200	22 400
Допустима навантага на вісь:		
– кН	80,0	88,26
– кГс	8 158	9 000
Коля коліс, м	1,435	
Кількість пасажирських дверей, од.	3	4
– Тип дверей	подвійні	

Номінальна пасажировмісність будь-якого пасажирського колісного транспортного засобу громадського користування, зокрема трамвайних вагонів, обмежена допустимою місткістю:

- за площею пасажирського салону;
- за допустимою повною масою вагона,

тобто

$$N_{\text{ном}}^s \geq N_{\text{ном}} \leq N_{\text{ном}}^m, \quad (1)$$

де  $N_{\text{ном}}^s$  – допустима номінальна місткість вагона за площею пасажирського салону, призначеного для встановлення сидінь і розміщення стоячих пасажирів, чол.;  $N_{\text{ном}}^m$  – допустима номінальна місткість вагона за допустимою повною масою, чол.

Допустиму повну масу трамвайних вагонів визначають за виразом:

$$[M_{\text{п}}] = \frac{n_{\text{кв}} \times n_{\text{ос}} \times [G_{\text{кв}}]}{g}, \quad (2)$$

де  $n_{\text{кв}}$  – кількість колісних двовісних візків, од.;  $n_{\text{ос}}$  – кількість осей у колісному візку, од.;  $[G_{\text{кв}}]$  – допустима навантага на одну вісь колісного візка, Н;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup> ( $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>).

Відповідно до вимог ДСТУ 4876, допустима навантага на одну вісь двовісних трамвайних колісних візків становить 80,0 кН (8 158 кГс).

Отже, для трамвайних вагонів із двома двовісними колісними візками допустима повна маса становить  $[M_{\text{п}}] = 32 632$  кг.

Номінальна пасажировмісність трамвайних вагонів за умови допустимої повної маси дорівнює:

$$N_{\text{ном}} = \frac{[M_{\text{п}}] - M_{\text{сп}} - m_{\text{вод}}}{m_{\text{пас}}}, \quad (3)$$

де  $M_{\text{сп}}$  – маса вагона у спорядженому стані, кг;  $m_{\text{вод}}$  – розрахункова маса водія трамвая;  $m_{\text{пас}}$  – розрахункова маса одного пасажиря, кг.

Для пасажирських колісних транспортних засобів громадського користування беруть  $m_{\text{вод}} = 75$  кг;  $m_{\text{пас}} = 68$  кг.

Отже, допустима номінальна пасажировмісність трамвайного вагона моделі «Stadler 82202», принаймні, для експлуатації на вітчизняних маршрутах, за допустимою масою пасажирів не може перевищувати 150 чол.

Номінальна пасажировмісність одинарного трамвайного вагона моделі «Vario LF» за допустимою повною масою може, навпаки, бути більшою і становити 149 чол., адже вказана місткість у 105 чол. обмежена питомою нормою стоячих пасажирів, що дорівнює 5 чол./м<sup>2</sup>. Тобто площа пасажирського салону цього вагона, призначена для розміщення стоячих пасажирів, становить:

$$S_{\text{пс}}^{\text{ст}} = \frac{(N_{\text{ном}}^{s5} - n_{\text{ос}}) \times \Delta s_5}{\Delta s_8}, \quad (4)$$

де  $N_{\text{ном}}^{s5}$  – номінальна пасажировмісність вагона за питомої норми 5 чол./м<sup>2</sup>, чол.;  $n_{\text{ос}}$  – кількість пасажирів, розміщених на одинарних си-

діннях, чол.;  $\Delta s_5$  та  $\Delta s_8$  – питомі площі на одного стоячого пасажира за питомих норм 5 та 8 чол./м<sup>2</sup> відповідно.

Питомі площі на одного пасажира становлять  $\Delta s_5 = 0,2$  м<sup>2</sup>/чол. за питомої норми 5 чол./м<sup>2</sup> та  $\Delta s_8 = 0,125$  м<sup>2</sup>/чол. за норми 8 чол./м<sup>2</sup>. Отже, номінальна пасажировмісність одинарного вагона моделі «Vario LF» за питомої норми 8 чол./м<sup>2</sup> становить 154 чол. (130 + 24). Оскільки ця місткість більша за допустиму, визначену допустимою повною масою, номінальна пасажировмісність одинарного трамвая моделі «Vario LF», довжина кузова якого становить 14,1 м, обмежена величиною 149 чол.

Якщо номінальна пасажировмісність одинарного вагона за обома обмежувальними критеріями (149 чол.) більша ніж двосекційного вагона (146 чол.) за умови застосування однакової питомої норми 8 чол./м<sup>2</sup>, то експлуатація двосекційного вагона є економічно недоцільною.

Отже, у процесі ескізного проектування нових перспективних трамвайних вагонів, за умови застосування двох двовісних колісних візків, визначальними є розмірні параметри, параметри мас та номінальна пасажировмісність одинарного вагона.

Оскільки колеса двовісних колісних візків поворотного типу під час руху по криволінійних ділянках маршрутів із мінімально допустимими радіусами кривизни рейок займають доволі багато місця і суттєво зменшують ширину між арками колісних візків, пропонуємо такі способи зменшення цього недоліку:

- застосування двосекційних вагонів із довжиною кузовів, максимально можливою для одинарного вагона із шириною кузова, рівною 2,5 м;
- застосування замість двох двовісних колісних візків чотирьох одновісних.

Перший спосіб передбачає застосування неповоротних колісних візків за рахунок значного зменшення довжини кузова кожної секції вагона.

Другий спосіб полягає в застосуванні одновісних колісних візків у двох варіантах:

- поворотного типу зі спільною віссю коліс;
- із незалежною підвіскою і вільним повертанням кожного колеса.

За рахунок того, що вертикальна вісь обертання одновісного колісного візка проходить через вісь коліс, а не через вісь двовісного візка, кут його повороту буде меншим. Тому ширина арок коліс одновісного візка теж буде меншою порівняно з арками коліс двовісного візка. Ще меншою буде ширина арок коліс із незалежною підвіскою.

Отже, для проведення досліджень необхідне розроблення ескізних проектів одинарного і зчленованих двосекційних вагонів на основі застосування традиційних компоновальних схем із двома двовісними колісними візками та інноваційної компоновальної схеми з чотирма одновісними колісними візками.

### Результати

Для розроблення ескізних проектів одинарного та двосекційних трамвайних вагонів за пропонуваними компоновальними схемами взято такі вихідні параметри:

- ширина кузова вагонів – 2,5 м;
- база колісного візка – 1,8 м;
- діаметр колеса візка – 0,6 м;
- ширина колії візка – 1,524 м;
- довжина шарнірної секції зчленованих вагонів – 0,8 м.

Довжину кузова одинарного трамвайного вагона визначають графічним методом за умови забезпечення вимоги маневреності. Відповідно до вимог ДСТУ 4070 [1], трамвайний вагон, призначений для експлуатації на коліях шириною 1,524 м, повинен проходити криву ділянку шляху радіусом 20 м, при цьому точки його кузова, які найбільш виступають, повинні описувати кола радіусом:

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

Визначення довжини кузова одинарного вагона графічним способом за взятих вихідних параметрів відповідно до вказаних вище вимог наведено на рис. 2.

Для вагона, ширину кузова якого 2,5 м, колісна база становить 7,45 м. Довжину вагона взято 15,6 м за ширини передньої і задньої стінок 1,47 м.

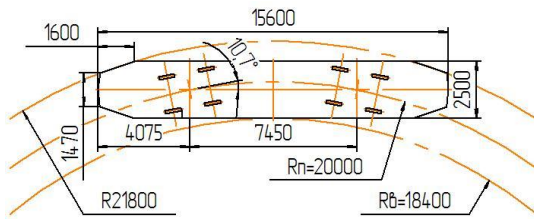


Рис. 2. Визначення довжини одинарного трамвайного вагона

Fig. 2. Determining the length of a single tramcar

Відповідно до запропонованої концепції створення зчленованих двосекційних трамвайних вагонів, довжину їх кузовів беремо рівною довжині одинарного вагона, тобто 15,6 м. Розмірні параметри секцій кузовів вагонів показано на рис. 3.

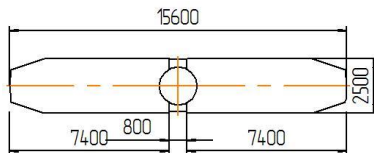


Рис. 3. Розмірні параметри кузовів двосекційних трамвайних вагонів

Fig. 3. Dimensional parameters of two-section tramcar bodies

Остаточне визначення розмірних параметрів двосекційного вагона, обладнаного двома двовісними колісними візками, показано на рис. 4.

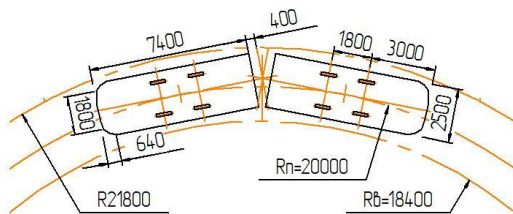


Рис. 4. Розмірні параметри кузова двосекційного трамвайного вагона, обладнаного двома двовісними колісними візками

Fig. 4. Dimensional parameters of the body of a two-section tramcar equipped with two biaxial wheeled bogies

Остаточне визначення розмірних параметрів двосекційного вагона на основі застосування запропонованої інноваційної компоувальної схеми, обладнаного чотирма одновісними колісними візками, показано на рис. 5.

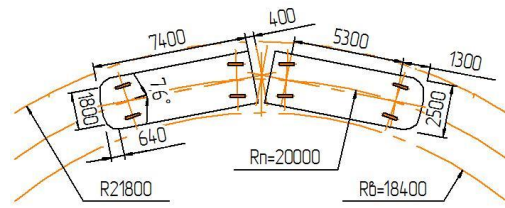


Рис. 5. Розмірні параметри кузова двосекційного трамвайного вагона, обладнаного чотирма одновісними колісними візками

Fig. 5. Dimensional parameters of the body of a two-section tramcar equipped with four uniaxial wheeled bogies

Порівняння кутів поворотів двовісних (рис. 2) та одновісних (рис. 5) колісних візків показує, що застосування запропонованої інноваційної компоувальної схеми з чотирма одновісними колісними візками забезпечує зменшення кутів поворотів до  $7,6^\circ$ , тобто на  $3,1^\circ$ . Звісно, зменшення кутів поворотів одновісних колісних візків у сукупності зі значно меншим вильотом їх коліс (рис. 6) забезпечує суттєве збільшення ширини проходів між колісними арками візків.

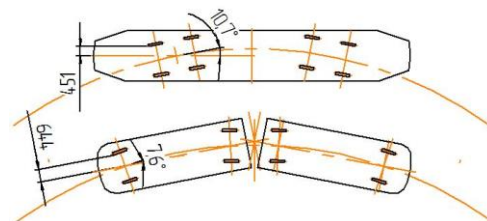


Рис. 6. Визначення вильоту коліс трамвайних двовісних та одновісних візків

Fig. 6. Determination of wheel overhang for tram biaxial and uniaxial bogies

Із рис. 6 зрозуміло, що запропонована інноваційна компоувальна схема двосекційного трамвайного вагона, яка передбачає застосування чотирьох одновісних колісних візків, забезпечує більшу ширину між колісними арками на 0,38 м.

З іншого боку, у ходовій частині двосекційного вагона, обладнаного двома двовісними колісними візками, узагалі застосовують неповоротні візки, що забезпечує більшу ширину між колісними арками на 0,114 м відносно до компоувальної схеми з чотирма одновісними візками. Проте розміщення колісних візків майже у середніх частинах пасажирських салонів передньої та задньої секцій кузовів негати-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

вно впливає на оптимальність їх планування.

Для проведення досліджень з оцінки технічної досконалості та комфортабельності перевезень пасажирів одинарним та зчленованими двосекційними вагонами з розмірними параметрами, наведеними на рис. 2, 4 та 5, розроблено ескізні проекти вагонів за умови розміщення в пасажирських салонах однакової кількості одинарних сидінь.

Планування пасажирського салону двосекційного вагона моделі АПП–Тд01, спроектованого на основі пропонованої компоувальної схеми з чотирма одновісними колісними візками поворотного типу, взяте як базове за кількістю одинарних пасажирських сидінь, наведено на рис. 7.

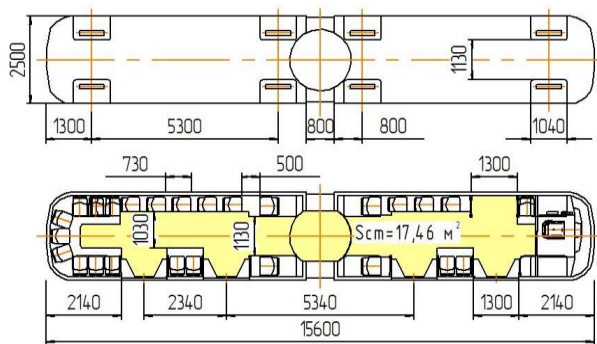


Рис. 7. Планування пасажирського салону двосекційного трамвайного вагона моделі АПП–Тд01

Fig. 7. Layout of the passenger compartment of a two-section tramcar of the APP–Td01 model

Максимально можливу номінальну пасажиромісність трамвайного вагона, регламентовану площею пасажирського салону, визначаємо таким чином:

$$N_{\text{ном}}^{\text{с8}} = n_{\text{ос}} + \Delta s_{\text{г}} \times S_{\text{пс}}^{\text{с8}}. \quad (5)$$

Оскільки в пасажирському салоні двосекційного вагона моделі АПП–Тд01 за взятого варіанта дворядного планування вдалося встановити 26 одинарних сидінь, то  $N_{\text{ном}}^{\text{с8}} = 166$  чол.

Планування пасажирського салону двосекційного вагона моделі АПП–Тд02, спроектованого на основі компоувальної схеми з двома двовісними колісними візками неповоротного типу, за умови  $n_{\text{ос}} = 26$  сид., наведено на рис. 8.

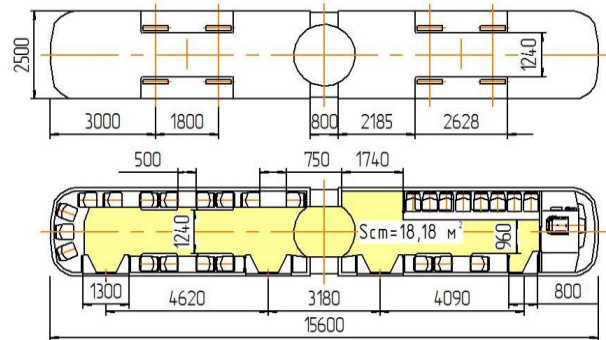


Рис. 8. Планування пасажирського салону двосекційного трамвайного вагона моделі АПП–Тд02

Fig. 8. Layout of the passenger compartment of a two-section tramcar of the APP–Td02 model

Планування пасажирського салону одинарного вагона моделі АПП–То01, спроектованого на основі компоувальної схеми з двома двовісними колісними візками поворотного типу, за умови  $n_{\text{ос}} = 26$  сид., наведено на рис. 9.

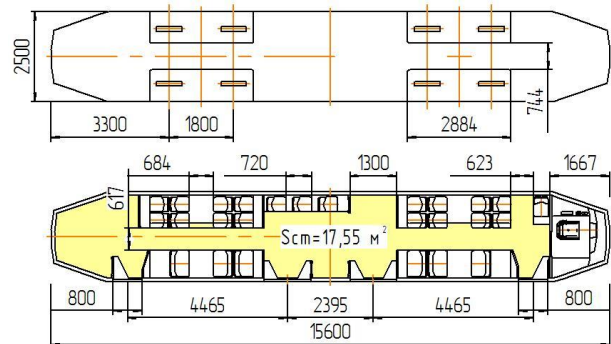


Рис. 9. Планування пасажирського салону одинарного трамвайного вагона моделі АПП–То01

Fig. 9. Layout of the passenger compartment of a single tramcar of the APP–To01 model

Розрахункову максимальну номінальну пасажиромісність двосекційних трамвайних вагонів моделей АПП–Тд01 і АПП–Тд02 та одинарного вагона моделей АПП–То01, регламентовану площами їх пасажирських салонів за питомої норми 8 чол./м<sup>2</sup>, наведено в табл. 2.

Як видно з планувань пасажирських салонів вагонів моделей АПП–Тд01 та АПП–То01, для їх комплектації застосовано, окрім одинарних сидінь шириною 0,42 м, сидіння збільшеної ширини до 0,522 та 0,743 м, відповідно, призначених для розміщення пасажирів із дітьми.

Таблиця 2

**Розрахункові параметри пасажировмісності  
трамвайних вагонів  
моделей АПП–Тд01, АПП–Тд02 та АПП–То01**

Table 2

**Design parameters of passenger capacity of tramcars  
of APP–Td01, APP–Td02 and APP–To01 models**

Модель вагона	АПП–Тд01	АПП–Тд02	АПП–То01
Розмірні параметри кузовів, м:	15,6		
– довжина	15,6		
– ширина	2,5		
Номінальна пасажировмісність за площею пасажирського салону, $N_{\text{ном}}^{s8}$ , чол.:	166   171   166		
– за нормі 8 чол./м <sup>2</sup>	166	171	166
– кількість одинарних сидінь:	26		
– нормальної ширини	22	26	20
– збільшеної ширини	4	–	6

Максимальну номінальну пасажировмісність трамвайних вагонів за допустимою повною масою визначаємо за формулою (3). Масу спорядженого вагона пропонуємо визначати за питомою масою вагонів-аналогів:

$$M_{\text{сп}} = \Delta m_{\text{сп}}^k \times k_b \times L_k, \quad (6)$$

де  $\Delta m_{\text{сп}}^k$  – питома маса спорядженого кузова двосекційного вагона-аналога сучасної моделі, обладнаного двома двовісними колісними візками, кг/м;  $k_b$  – коефіцієнт, який враховує збільшення або зменшення спорядженої маси кузова проєктованого вагона, ширина кузова якого більша або менша за ширину кузова вагона-аналога;  $L_k$  – довжина кузова проєктованого вагона, м.

Питома маса спорядженого кузова вагона-аналога без урахування мас колісних візків, пантографа, комплектувальних виробів системи керування тяговим приводом, пасажирських сидінь та сидіння водія становить:

$$\Delta m_{\text{сп}}^k = \frac{M_{\text{сп}}^a - \left( 2m_{\text{кв}} + m_{\text{п}} + m_{\text{ск}} + n_{\text{ос}} \times m_{\text{ос}} + m_{\text{св}} \right)}{L_k^a}, \quad (7)$$

де  $M_{\text{сп}}^a$  – споряджена маса вагона-аналога, кг;  $m_{\text{кв}}$  – маса колісного двовісного візка з колією відповідної ширини, кг;  $m_{\text{п}}$  – маса пантографа, кг;  $m_{\text{ск}}$  – маса комплектувальних виробів системи керування тяговим приводом, кг;  $m_{\text{ос}}$  – маса одинарного пасажирського сидіння, кг;  $m_{\text{св}}$  – маса сидіння водія, кг;  $L_k^a$  – довжина кузова вагона-аналога, м.

На етапі ескізного проєктування рекомендовано брати  $m_{\text{кв}} = 4\,800$  кг (для візка з колією 1,542 м),  $m_{\text{п}} = 340$  кг,  $m_{\text{ск}} = 1\,000$  кг,  $m_{\text{ос}} = 10$  кг,  $m_{\text{св}} = 25$  кг. Отже,  $\Delta m_{\text{сп}}^k = 547$  кг/м.

Для проведення розрахунків із визначення параметрів мас проєктованих вагонів на стадії розроблення ескізних пропозицій рекомендовані величини  $k_b$  визначаємо за виразами:

$$k_b = \frac{B_k^{\text{пп}}}{B_k^{\text{ан}}}, \quad \text{при } B_k^{\text{пп}} > B_k^{\text{ан}}; \quad (8.1)$$

$$k_b = \frac{B_k^{\text{ан}}}{B_k^{\text{пп}}}, \quad \text{при } B_k^{\text{пп}} < B_k^{\text{ан}}, \quad (8.2)$$

де  $B_k^{\text{пп}}$  та  $B_k^{\text{ан}}$  – ширина кузова проєктованого вагона та вагона-аналога відповідно, м.

Для вагона моделі «Stadler 82202» споряджена маса дорівнює 22 400 кг за ширини кузова  $B_k^{\text{ан}} = 2,3$  м;  $\Delta m_{\text{сп}}^k = 547$  кг/м. Тому для проєктованих вагонів із шириною кузовів  $B_k^{\text{пп}} = 2,5$  м  $k_b = 1,087$ ;  $\Delta m_{\text{сп}}^k = 595$ , кг/м.

Отже, споряджена маса кузовів вагонів моделі АПП–Тд02 становить  $M_{\text{сп}} = 20\,520$  кг, вагона АПП–Тд01 –  $M_{\text{сп}} = 20\,530$  кг (з урахування чотирьох ширших сидінь). Споряджена маса одинарного вагона АПП–То01 дорівнює 20 570 кг.

Розрахункову максимальну та фактичну номінальну пасажировмісність двосекційних трамвайних вагонів моделей АПП–Тд01 і АПП–Тд02 та одинарного вагона моделі АПП–То01, регламентовану допустимою повною масою вагонів, наведено в табл. 3.



Таблиця 3

**Розрахункові параметри пасажировмісності трамвайних вагонів моделей АПП–Тд01, АПП–Тд02 та АПП–То01**

Table 3

**Design parameters of passenger capacity of tramcars of APP–Td01, APP–Td02 and APP–To01 models**

Модель вагона	АПП–Тд01	АПП–Тд02	АПП–То01
Максимальна номінальна пасажировмісність вагонів, чол.:			
– за площею пасажирського салону за норми 8 чол./м <sup>2</sup>	166	171	166
– за допустимою повною масою		178	177
Номінальна пасажировмісність вагонів, чол.	166	171	166

Оскільки довжина й ширина кузовів вагонів порівнюваних моделей однакові, а їх споряджені маси відрізняються всього на 10...50 кг, для проведення оцінки їх конструктивної та експлуатаційної досконалості пропонуємо такі показники:

– коефіцієнт питомої номінальної пасажировмісності за площею пасажирського салону:

$$k_N^s = 1 - k_p \times \frac{S_{\text{пс}}}{N_{\text{ном}}}, \quad (9)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт розмірності, м<sup>2</sup>/чол.;  $S_{\text{пс}}$  – площа пасажирського салону, м<sup>2</sup> (визначають графічним способом);

– коефіцієнт кількості пасажирських дверей:

$$k_{\text{дв}}^n = 1 - \frac{1}{2n_{\text{пдв}} + n_{\text{одв}}}, \quad (10)$$

де  $n_{\text{пдв}}$  та  $n_{\text{одв}}$  – кількість пасажирських дверей подвійних та одинарних відповідно, од;

– коефіцієнт рівномірності розміщення пасажирських дверей за довжиною пасажирського салону:

$$k_{\text{дв}}^l = \frac{\sum l_{\text{дв}}}{L_{\text{к}} - (l_{\text{вв}} + t_{\text{зс}})}, \quad (11)$$

де  $\sum l_{\text{дв}}$  – сума відстаней між двома суміжними пасажирськими дверима, м;  $l_{\text{вв}}$  – довжина відділення водія трамвая, м;  $t_{\text{зс}}$  – товщина задньої стінки кузова вагона, м;

– коефіцієнт зручності проходу (ширини проходу) по пасажирському салону:

$$k_{\text{пр}} = \frac{b_{\text{пр}}^{\text{мін}}}{B_{\text{к}}^{\text{пр}} - 2t_{\text{б}}}, \quad (12)$$

де  $b_{\text{пр}}^{\text{мін}}$  – найменша ширина проходу по пасажирському салону вагона, м;  $t_{\text{б}}$  – товщина боковини кузова вагона, м;

– коефіцієнт розміщення (орієнтації відносно напрямку руху) одинарних пасажирських сидінь, який характеризує комфортабельність перевезень пасажирів:

$$k_{\text{ос}}^p = 1 - \frac{1,25n_{\text{ос}}^6 + 1,5n_{\text{ос}}^3}{\sum n_{\text{ос}}}, \quad (13)$$

де 1,25 і 1,5 – коефіцієнти, які враховують незручність проїзду на сидіннях, установлених спинками до боковин кузова та проти напрямку руху відповідно, м;  $n_{\text{ос}}^6$  та  $n_{\text{ос}}^3$  – кількість одинарних сидінь, установлених спинками до боковин кузова та проти напрямку руху відповідно, од;

– коефіцієнт застосування пасажирських сидінь збільшеної ширини (для пасажирів із дітьми дошкільного віку):

$$k_{\text{од}}^b = \frac{n_{\text{од}}^b}{n_{\text{од}}} \times \frac{b_{\text{од}}^b}{b_{\text{од}}}, \quad (14)$$

де  $n_{\text{од}}^b$  – кількість одинарних сидінь збільшеної ширини, од.;  $b_{\text{од}}^b$  та  $b_{\text{од}}$  – ширина сидінь збільшеної та нормальної (регламентованої) ширини відповідно, м;

– коефіцієнт маневреності трамвайного вагона

$$k_{\text{ман}} = 1 - \frac{b_{\text{кор}}^{\text{пр}}}{b_{\text{кор}}^p}, \quad (15)$$

де  $b_{\text{кор}}^{\text{пр}}$  – ширина коридору в разі руху вагона по кривій радіусом 20,0 м;  $b_{\text{кор}}^p$  – допустима

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ширина коридору під час руху вагона по кривій радіусом 20,0 м (для вагонів із шириною кузова 2,5 м  $b_{\text{кор}}^p = 3,4$  м).

Для проведення розрахунків взято такі величини параметрів:  $l_{\text{вв}} = 1,667$  м;  $t_{\text{зс}} = 0,1$  м;  $t_6 = 0,1$  м.

Інші параметри вагонів запропонованих моделей визначено на основі розроблених планувальних їх пасажирських салонів.

Результати проведених розрахунків із визначення коефіцієнтів конструктивної досконалості трамвайних вагонів порівнюваних моделей наведено в табл. 4.

Таблиця 4

**Розрахункові коефіцієнти конструктивної досконалості трамвайних вагонів моделей АПП–Тд01, АПП–Тд02 та АПП–То01**

Table 4

**Design coefficients of structural perfection of tramcars of APP–Td01, APP–Td02 and APP–To01 models**

Модель вагона	АПП–Тд01	АПП–Тд02	АПП–То01
Номинальна пасажировмісність вагона, чол.	166	171	166
Площа пасажирського салону, м <sup>2</sup>	30,735		31,046
Коефіцієнт питомої номінальної пасажировмісності, $k_N^s$ , чол./м <sup>2</sup>	0,815	0,820	0,813
Кількість пасажирських дверей, од.:			
– подвійних	4	3	2
– одинарних	–	1	2
Коефіцієнт кількості пасажирських дверей, $k_{\text{дв}}^n$	0,875	0,857	0,833
Довжина пасажирського салону, м	13,833		
Сумарна відстань між серединами суміжних дверей, м	10,02	11,89	11,325
Коефіцієнт рівномірності розміщення пасажирських дверей, $k_{\text{дв}}^l$	0,724	0,859	0,819
Мінімальна ширина проходу по пасажирському салону, м	1,03	0,96	0,617
Коефіцієнт ширини проходів по пасажирському салону, $k_{\text{пр}}$	0,448	0,417	0,268
Кількість одинарних сидінь, розміщених:			
– спинками до боковин кузова	11	8	1
– спинками проти напрямку руху	2	6	11
Коефіцієнт розміщення одинарних пасажирських сидінь, $k_{\text{ос}}^p$	0,356	0,269	0,317
Кількість одинарних сидінь, од.:			
– регламентованої ширини	22	26	20
– збільшеної ширини	4	–	6
Ширина одинарних сидінь, м:			
– регламентованої ширини	0,42		
– збільшеної ширини	0,522	–	0,743

Продовження табл. 4

Continuation of Table 4

Модель вагона	АПП–Тд01	АПП–Тд02	АПП–То01
Коефіцієнт застосування пасажирських сидінь більшої ширини, $k_{од}^b$	0,226	–	0,408
Ширина коридору в разі руху вагона по кривій радіусом 20,0 м, м:			
– розрахункова	2,74	2,78	3,39
– допустима		3,4	
Коефіцієнт маневреності вагона, $k_{ман}$	0,194	0,182	0,003

Загальний коефіцієнт конструктивної та експлуатаційної досконалості визначаємо за виразом:

$$k_K = \frac{k_N^s + k_{дв}^n + k_{дв}^l + k_{пр} + k_{ос}^p + k_{ман}}{6}. \quad (16)$$

Розрахункову величину загального коефіцієнта конструктивної та експлуатаційної досконалості порівнюваних моделей трамвайних вагонів, розроблених за різними компоновальними схемами, наведено в табл. 5.

Таблиця 5

**Коефіцієнт конструктивної та експлуатаційної досконалості трамвайних вагонів моделей АПП–Тд01, АПП–Тд02 та АПП–То01**

Table 5

**Coefficient of structural and operational perfection of tramcars of APP–Td01, APP–Td02 and APP–To01 models**

Модель вагона	АПП–Тд01	АПП–Тд02	АПП–То01
Сумарний коефіцієнт конструктивної та експлуатаційної досконалості вагонів, $k_E$	0,520	0,486	0,495

### Наукова новизна та практична значимість

Уперше розроблено методику об'єктивної оцінки конструктивної та експлуатаційної досконалості трамвайних вагонів з однаковими розмірними параметрами їх кузовів – довжиною і шириною, створеними за трьома різними

компоновальними схемами на основі застосування двох двовісних або чотирьох одновісних колісних візків.

Обґрунтовано вибір уже на стадії розроблення ескізних пропозицій інноваційної компоновальної схеми з чотирма одновісними колісними візками для створення перспективних конкурентоспроможних моделей зчленованих двосекційних трамвайних вагонів.

### Висновки

Пропонована компоновальна схема для створення нових перспективних моделей зчленованих двосекційних трамвайних вагонів на основі застосування чотирьох одновісних колісних візків забезпечує такі конкурентні переваги порівняно з одинарними або двосекційними вагонами, обладнаними двома двовісними колісними візками, за умови однакових розмірних параметрів їх кузовів – довжини, ширини і висоти:

- установлення у кожній секції вагона двох подвійних пасажирських дверей;
- забезпечення кращих умов проходів по пасажирському салону за рахунок більш широких проходів;
- більш комфортабельне розміщення одинарних пасажирських сидінь, лише два з яких установлені спинками проти напрямку руху;
- установлення в пасажирському салоні чотирьох пасажирських сидінь, ширина яких більша на 24,3 %.

Оскільки номінальна пасажиромісткість вагона моделі АПП–Тд01 регламентована площею пасажирського салону, вона може бути збільшена за рахунок оптимізації довжини його кузова за умови рівності місткостей вагона за

площею пасажирського салону і за допустимою масою пасажирів.

Подальші дослідження повинні бути пов'язані з більш точним визначенням маси спорядженого вагона за рахунок зменшення маси несного кузова, оскільки кожна його сек-

ція спирається на два одновісні візки, тобто силова схема секцій кузовів більш оптимальна. Окрім того, одновісні візки можуть бути виконані в безредукторному варіанті, тобто з меншою власною масою.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 4070-2002. Вагони трамвайні. Вимоги безпеки й охорони навколишнього середовища. [Чинний від 2002-03-19]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 33 с.
2. ДСТУ 4876:2007. Вагони трамвайні пасажирські. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2007-11-21]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 39 с.
3. Палант О. Ю., Джабраїлов А. М. Економічні переваги конструкцій будови трамвайних колій. *Економічний простір*. 2021. № 171. С. 42–46. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/171-7>
4. Chudzikiewicz A., Maciejewski I., Krzyzynski T., Krzyszkowski A., Stelmach A. Electric Drive Solution for Low-Floor City Transport Trams. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 13. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134640>
5. Chudzikiewicz A., Sowiński B. 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)* (Graz, 17-21 August 2015). Graz, 2015. P. 1427–1434.
6. Jeong N-T., Wangl M., Yoo S., Kim W-K., Han S-Y., Lee H.-Y., Suh M-W. Conceptual design of high-speed semi-low-floor bogie for train-tram. *International Journal of Automotive Technology*. 2017. Vol. 18. Iss. 3. P. 523–533. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-017-0052-2>
7. Kolař J. Design of a Wheelset Drive. *Transactions on Electrical Engineering*. 2015. Vol. 4, No. 1. P. 11–19.
8. Kolař J. Trends of development in conception of sectioned low-floor tramways. 2007. URL: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2007-34-Kolar.pdf>
9. Megna G., Bracciali A. Technical Comparison of Commercially Available Trams and Review of Standardization Frame and Design Principles. *Urban Rail Transit*. 2022. Vol. 8. Iss. 1. P. 16–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-021-00163-6>
10. Orekhov V. V., Abbasov I. B. Conceptual Modeling of a Tramcar. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2021. Vol. 10. Iss. 4. P. 1115–1121.
11. Smatlak J. Development of Guidelines for Modern Streetcar Vehicles. 2012. URL: <http://reconnectingamerica.org/assets/Uploads/20120906SmatlakLRTConferencePaper.pdf>
12. Von Rohr J. Low-Floor Light Rail Vehicle Development in Europe. *Transportation research record 1361*. 1992. P. 66–72

S. V. VOYTKIV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Scientific and Technical Center «Avtopoliprom», Zubrivska St., 32/24, Lviv, Ukraine, 79066, tel. +38 (067) 447 04 90, e-mail [voytkivsv@ukr.net](mailto:voytkivsv@ukr.net), ORCID 0000-0002-7789-2081

## Development and Analysis of an Innovative Layout Scheme of an Articulated Two-Section Tram Tramcar

**Purpose.** The main objective of the work is to develop and analyze the optimal layout of an articulated two-section tramcar for the creation of promising competitive models of cars of a significantly higher technical level, as well as to assess the prospects for their mass production provided that the maximum passenger capacity is ensured. **Methodology.** Based on the analysis of the regulated technical requirements for the dimensional parameters of tramcars, maneuverability parameters and permissible loads on their wheeled bogies, as well as on the analysis of the main technical parameters of existing models of single and two-section tramcars equipped with two biaxial wheeled bogies - body length and curb weight - the permissible length of their bodies and the estimated weight in the equipped state were determined. Two biaxial wheeled bogies were replaced by four uniaxial bogies.

**Findings.** An innovative layout of an articulated two-section tramcar based on the use of four single-axle wheeled bogies and minimization of overhangs of body sections was proposed and developed, provided that the maximum length of a single tramcar and the track of wheeled bogies and the width of the car were preserved. A methodology has been developed for assessing the effectiveness of the proposed design solutions and the comfort of passenger transportation by single and two-section tramcars with two biaxial and four single-axial wheeled bogies, the preliminary designs of which have been developed according to three different layout schemes. **Originality.** For the first time, a layout of an articulated two-section tramcar is proposed based on an innovative solution - the use of four uniaxial wheeled bogies instead of two biaxial ones. A methodology for analyzing and evaluating the feasibility of using the proposed layout for creating promising models of a two-section tramcar has been developed. **Practical value.** The choice of an optimal innovative layout scheme with four uniaxial wheeled bogies for the creation of promising competitive models of articulated two-section tramcars with optimized parameters of their body length and nominal passenger capacity with higher passenger comfort compared to existing analog tramcars has been substantiated at the stage of developing draft proposals.

**Keywords:** two-section tramcar; layout diagram; wheeled bogie; dimensional parameters of the car; constructive perfection of cars; competitiveness of tramcars

## REFERENCES

1. *Vahony tramvaini. Vymohy bezpeky y okhorony navkolyshnoho seredovyshcha*, 33 DSTU 4070-2002. (2002). (in Ukrainian)
2. *Vahony tramvaini pasazhyrski. Zahalni tekhnichni vymohy*, 39 DSTU 4876:2007. (2007). (in Ukrainian)
3. 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> (in Ukrainian)
4. Chudzikiewicz, A., Maciejewski, I., Krzyżyński, T., Krzyszkowski, A., & Stelmach, A. (2022). Electric Drive Solution for Low-Floor City Transport Trams. *Energies*, 15(13), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134640> (in English)
5. Chudzikiewicz, A., & Sowiński, B. (2015). Modelling and simulation of trams bogies with fully independently rotating wheels. In *Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks: Proceedings of the 24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD 2015)* (pp. 1427-1434). Graz, Austria. (in English)
6. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-017-0052-2> (in English)
7. Kolař, J. (2015). Design of a Wheelset Drive. *Transactions on Electrical Engineering*, 4(1), 11-19. (in English)
8. Kolař, J. (2007). Trends of development in conception of sectioned low-floor tramways. Retrieved from <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2007-34-Kolar.pdf> (in Czech)
9. 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> (in English)
10. Orekhov, V. V., & Abbasov, I. B. (2021). Conceptual Modeling of a Tramcar. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 10(4), 1115-1121. (in English)
11. Smatlak, J. (2012). Development of Guidelines for Modern Streetcar Vehicles. Retrieved from <http://reconnectingamerica.org/assets/Uploads/20120906SmatlakLRTConferencePaper.pdf> (in English)
12. Von Rohr, J. (1992). Low-Floor Light Rail Vehicle Development in Europe. *Transportation research record* 1361, 287-295. (in English)

Надійшла до редколегії: 25.11.2022

Прийнята до друку: 27.03.2023