

Аналіз технічної досконалості міських тролейбусів з автономним рухом

Войтків С. В.

Науково-технічний центр «Автополіпром»

Анотація. Тролейбусний транспорт, як один з видів екологічно чистого транспорту, застосовується для перевезень пасажирів у понад 280 містах багатьох країн світу. У 20-у столітті, поряд з традиційними тролейбусами, все ширшого застосування набувають тролейбуси з автономним рухом. Проте, в нашій державі тролейбуси з АХ, виготовлені українськими підприємствами, лише у чотирьох екземплярах проходять експлуатаційні випробування. Метою роботи являється оцінка технічної досконалості міських тролейбусів різних типів та вибір оптимального типу тролейбуса з АХ для проектування та організації дрібносерійного виробництва на підприємствах України та подальшої їх експлуатації на міських та приміських маршрутах. Розроблено п'ять варіантів ескізних проектів міських тролейбусів різних типів, запропонована методика та проведено аналіз їх конструктивних і експлуатаційних параметрів, на основі якого обґрунтований вибір типу міського тролейбуса з АХ для проектування перспективних конкурентоспроможних моделей або модифікацій, які найбільш придатні для застосування у системах міських та приміських перевезень пасажирів на даному етапі економічного розвитку України.

Ключові слова: тролейбусний транспорт; тип тролейбуса; технічна досконалість тролейбуса; пасажиромістимість тролейбуса; параметри мас тролейбуса; автономний пробіг; міська інфраструктура.

Вступ

У 20-у столітті стратегічним напрямком розвитку систем міських перевезень пасажирів у всіх розвинутих країнах світу являється перехід на застосування екологічно чистих транспортних засобів. До таких, безумовно, належить і тролейбусний транспорт, яким у 2021 році було перевезено 594,4 млн. пасажирів. Для порівняння, іншими видами електричного транспорту у тому ж році перевезено 398,0 млн. пасажирів трамвайним транспортом та 482,6 млн. пасажирів метрополітемом. Тобто, із міських видів електричного транспорту частка тролейбусних пасажирських транспортних засобів громадського користування (ПТЗ ГК) складає понад 40 %.

На нинішній час для перевезень пасажирів у понад 265 містах різних країн світу застосовуються тролейбуси двох принципово різних типів:

– класичні тролейбуси, тягові електродвигуни (ТЕД) яких отримують живляться ви-

ключно від зовнішнього джерела електричної енергії (ДЕЕ) через контактну електричну мережу;

– тролейбуси з автономним ходом (АХ), які обладнуються додатковими автономними ДЕЕ і здатні рухатися на ділянках маршрутів, не обладнаних двоконтактною електричною мережею.

Тролейбуси з АХ за типом автономних ДЕЕ теж поділяються на три принципово різних типи:

– тролейбуси з ДГУ, обладнані дизель-генераторною установкою;

– тролейбуси ІМС (англ. *In-Motion-Charging*), які обладнані системою заряджання/підзаряджання автономних ДЕЕ під час руху за маршрутом;

– тролейбуси FC (FC – англ. *fuel cell*), обладнані паливними елементами (ПЕ).

Тролейбуси ІМС, у свою чергу, в залежності від типу застосовуваних автономних ДЕЕ, який визначається їх складом і конс-

труктивною будовою, поділяються на два підтипи:

- ІМС-В (В – англ. Battery), обладнані тяговими акумуляторними батареями (АКБ);
- ІМС-S (S – англ. Supercapacitor), обладнані тяговими суперконденсаторами (СК) – іоністорами;

Кожному типу та підтипу тролейбусів властиві, звісно, як переваги так і відповідні недоліки. Їх врахування при виборі найоптимальнішого типу тролейбусів з АХ та напрямків їх проектування, організації виробництва й експлуатації на міських і приміських маршрутах за існуючого стану економічного розвитку країни, набуває вкрай важливого значення.

Аналіз публікацій

Проблемам відродження тролейбусного транспорту у багатьох містах європейських, американських та інших країн на новому, суттєво вищому рівні, завдяки застосуванню тролейбусів з автономним рухом або ходом (АХ), присвячена велика кількість досліджень. Їх результати стосуються, загалом, трьох груп основних питань, пов'язаних з технічними, економічними та соціальними проблемами проектування, виробництва та експлуатації таких ПТЗ ГК.

Загальному огляду еволюційних процесів розвитку тролейбусного транспорту, аналізу його тенденцій та перспективних напрямків присвячена робота [1]. У ній, зокрема, наголошено, що нині процес проектування, виготовлення дослідних зразків тролейбусів і їх випробувань та організація їх будь-якого виробництва потребує великих капітальних затрат. А повний цикл створення нових моделей, разом з науковими дослідженнями, розробленням технічної документації, проведенням сертифікаційних випробувань та технологічної підготовки дрібносерійного виробництва досягає трьох і більше років. Тому, одним з дуже важливих завдань являється адекватна оцінка інтенсивності очікуваних функціональних і споживчих властивостей перспективних моделей або модифікацій тролейбусів з АХ уже на ранніх стадіях їх розроблення, що, як наслідок, впливає на прийняття відповідних конструктивних рішень.

Аналіз основних лімітуючих факторів, які суттєво впливають на основні конструктивні та експлуатаційні параметри і властивості

тролейбусів з АХ, наведені у статті [2]. Основна увага у даній роботі була приділена аналізу саме таких транспортних засобів, обладнаних тяговими АКБ, та проблемам функціональності існуючих тролейбусних електричних мереж. Одна з двох основних переваг тролейбусів з АХ полягає у можливості рекуперації електроенергії під час процесів їх гальмування.

Проблеми багатофакторної оптимізації технічних та експлуатаційних параметрів тролейбусів з АХ розглянуті у роботі [3]. Запропонований її авторами алгоритм знаходження величин їх найбільш важливих конструктивних параметрів сприятиме забезпеченню формування і прийняття оптимальних рішень, пов'язаних з вибором комплектувальних виборів.

Результати одного з перших варіантів експлуатації тролейбусів з АХ у польському м. Гдиня, обладнаних тяговими АКБ невеликої енергопотужності, призначених лише для аварійного руху без живлення ТЕД від контактної мережі, наведені у статті [4]. Автори зазначають, що тролейбуси з АХ, обладнані ДГУ, хоча й являються, наразі, найбільш поширеними і володіють рядом суттєвих переваг, зокрема, дуже великим автономним рухом і незалежністю від тролейбусних мереж, все ж не мають подальших перспектив у застосуванні, оскільки не є повністю екологічно безпечними. Тягові СК, на їх думку, можна розглядати, радше, як варіант зниження споживання електроенергії ніж як рішення для проходження ділянки маршруту без зовнішнього ДТЕ. Саме тому, розвиток тролейбусів з АХ вони вбачають виключно на основі їх обладнання тяговими АКБ. Аналіз експлуатації тролейбусів з АХ [5], обладнаних тяговими АКБ типу NiCd (нікель-кадмієві), у польському м. Гдиня показав, що при максимальній глибині розряду 20 %, яка є оптимальною для забезпечення великого терміну служби тягових АКБ, довжина автономного шляху становить 2 км. За таких умов досягається біля 15 000 циклів їх заряджання та розряджання, що еквівалентно 7 рокам щоденного використання (5-10 маршрутів за день). Час підзаряджання тягових АКБ становить 20-40 хв., тобто, їх цілком можна повністю заряджати під час руху від контактної електромережі.

У 2021 році була опублікована нова робота [6], присвячена питанням постійної експлуатації тролейбусів з АХ у тому ж місті. Її

авторами було встановлено, що для їх експлуатації достатня потужність зарядних пристроїв, якими обладнуються тролейбуси з АХ, на рівні 100-150 кВт.

Два приклади тролейбусних систем, які використовують гібридні тролейбуси, тобто тролейбуси з АХ, представлено у дослідженні [7]. У ньому йдеться, зокрема, про досвід застосування літій-іонних (Li-Ion) тягових АКБ.

Перспективи застосування у тролейбусах з АХ тягових АКБ різних типів – NiCd, літій-тітанатних (LTO), літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) та нікель-марганцево-кобальтових (NMC) розглянуті у роботі [8]. За наведеними у ній даними у 2019 році тролейбуси з АХ у Польщі найчастіше обладнувались тяговими АКБ типу NMC, більш ніж вдвічі частіше ніж типу LTO та більш ніж втричі частіше ніж АКБ типів NiCd та LiFePO₄.

Складність вирішення комплексу питань щодо розширення тролейбусного сполучення з використанням існуючої інфраструктури, які включають різні технічні, організаційні та функціональні аспекти, розглянута у дослідженні [9]. У ній же наведений приклад застосування тролейбусів з АХ, обладнаних ДГУ, розміщеною не у кузові а у одноосійному причепі.

Перспективи розвитку систем перевезень пасажирів тролейбусами з АХ в Італії на основі аналізу існуючих мереж у різних містах проаналізовані у статті [10]. Висновки, які були зроблені у цій роботі ще у 1998 році, зокрема щодо зростання інтересу до тролейбусів з АХ, цілком справдилися.

Аналізу і еволюції розвитку конструкцій тролейбусів з АХ присвячена робота [11], у якій висвітлені переваги та недоліки різних їх типів, обладнаних ДГУ та тяговими АКБ.

Різні аспекти міської інфраструктури, необхідної для ефективної експлуатації тролейбусів з АХ, зокрема, параметри тягових електричних підстанцій та перспективи їх поєднання з електробусами типу ІМС, наведено в огляді [12].

Аналізу факторів, які впливають на розвиток міського транспорту Європейського Союзу та різних аспектів, зокрема, техніко-експлуатаційних параметрів використання тролейбусів в межах міст, особливо залучених до проекту "Тролей", присвячено дослідження [13, 14].

Потенціальні напрямки використання новітніх технологій, заснованих на тяговому

електроприводі міського громадського транспорту, проаналізовані у роботі [15].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є визначення та вибір оптимального типу тролейбуса з АХ і його оптимальних параметрів для створення та організації серійного виробництва перспективних конкурентоспроможних моделей тролейбусів на підприємствах України та подальшої їх експлуатації на міських і приміських маршрутах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних завдань:

- розроблення ескізних проектів тролейбусів різних типів на основі принципу "при інших однакових умовах";
- формування найбільш характерних показників для порівняльного аналізу тролейбусів різних типів;
- проведення порівняльного аналізу найбільш визначальних параметрів тролейбусів різних типів;
- оцінка технічної досконалості тролейбусів різних типів;
- вибір одного-двох типів тролейбусів з АХ для подальшого проектування та організації виробництва на вітчизняних підприємствах.

Вибір типів тролейбусів для розроблення ескізних проектів

Огляд та аналіз наведених вище та багатьох інших досліджень, пов'язаних з проблемами вибору оптимального типу тролейбусів, зокрема, тролейбусів з АХ для міських і приміських перевезень пасажирів, показує, що на даному етапі розвитку їх конструкцій найбільш придатними для застосування являються:

- тролейбуси "Classic" – тролейбуси класичного (стандартного) типу, найбільш розповсюджені на нинішньому етапі розвитку тролейбусного транспорту;
 - тролейбуси ІМС-В, які набувають все більшого застосування, особливо в останні десять років, зокрема, і на маршрутах вітчизняних міст;
 - тролейбуси ІМС-С, яких, наразі, на міських маршрутах європейських та інших країн світу експлуатується набагато менше, порівняно з тролейбусами підтипу ІМС-В.
- Тролейбуси з АХ ще одного типу – FC, у

найближчому десятилітті навряд чи зможуть набути бодай якогось широкого застосування, принаймні, на маршрутах вітчизняних міст, адже потребують будівництва спеціалізованих заводів та заправок станцій. А для їх будівництва необхідні дуже вагомні капіталовкладення.

Тролейбуси з ДГУ, які ще у середині минулого століття, застосовувалися для міських перевезень пасажирів, при деяких перевагах мають дуже суттєвий недолік – вони не являються екологічно чистими транспортними засобами. Тим не менше, цілком припустимим являється їх виробництво та експлуатація на маршрутах вітчизняних міст з невеликою чисельністю населення, особливо, принаймні, у найближчі десять-п'ятнадцять років.

Тому, все-таки, для розроблення ескізних проектів та порівняльного аналізу вибрані троллейбуси усіх типів та підтипів – "Classic", з ДГУ, ІМС-В, ІМС-С та FC.

Тролейбуси типу "Classic" – основні переваги та недоліки

Класичні троллейбуси, з огляду на конструктивні та експлуатаційні параметри, являються найбільш оптимальним типом пасажирських транспортних засобів громадського користування (ПТЗ ГК).

До загальних очевидних переваг троллейбусного транспорту відносяться повна екологічність та низький рівень зовнішнього і внутрішнього шуму.

Класичні троллейбуси у порівнянні з іншими типами і підтипами, завдяки відсутності автономних ДДЕ, характеризуються цілим рядом конструктивних та експлуатаційних переваг, зокрема:

- суттєво меншими показниками спорядженої маси та повної конструктивної маси, яка не може перевищувати 18000 кг;

- найбільшою номінальною пасажиромістимістю серед усіх типів колісних ПТЗ ГК, зокрема, автобусів, гібридних автобусів та електробусів, яка для троллейбусів з довжиною кузова біля 12,0 м сягає 105-106 чол., а при застосуванні тягових мостів з незалежною підвіскою коліс можливе її збільшення, щонайменше, до 110-115 чол.;

- можливістю кращого використання простору пасажирського салону для розміщення сидінь та пересування пасажирів завдяки відсутності великого моторного відсіку, наявного в автобусах;

- більшою надійністю завдяки меншій кількості агрегатів та комплектувальних виробів.

Проте, попри наведені переваги, троллейбуси "Classic" мають дуже важливий на сучасному етапі розвитку троллейбусного транспорту недолік – відсутність автономного руху на ділянках маршрутів, які не обладнані дводротовою електричною контактною мережею. Адже саме з цією властивістю троллейбусів пов'язана перспектива відродження троллейбусного транспорту на новому рівні.

Проте, це зовсім не передбачає повну відмову від застосування класичних троллейбусів.

Тролейбуси з ДГУ – основні переваги та недоліки

Тролейбуси з ДГУ відносяться до троллейбусів з АХ, які застосовували ще у першій половині 19-о століття.

Основними перевагами троллейбусів, обладнаних ДГУ, являються достатньо велика величина автономного ходу і застосування автономного ДДЕ, яке не потребує заряджання або підзаряджання від троллейбусної контактної мережі.

Проте, такі троллейбуси мають зменшену пасажиромістимість, наприклад, модель "Skoda 24Tr", яка виготовлялась до 2004 року, вмщала усього 86 чол. Окрім того, вони не відносяться до екологічно чистих, оскільки містять дизельний двигун. Щоправда, оскільки потужність двигуна ДГУ значно менша ніж необхідна для забезпечення руху автобусів такої повної конструктивної маси, їх екологічна безпечність вища ніж автобусів з дизельними силовими установками або гібридних електробусів з послідовним тяговим приводом.

Ще одним недоліком троллейбусів з ДГУ являється значно більша ринкова вартість за рахунок застосування дизельного двигуна, електричного генератора та інших комплектувальних виробів. З іншого боку, собівартість їх виготовлення все ж суттєво менша у порівнянні з собівартістю виробництва троллейбусів ІМС.

Тролейбуси підтипу ІМС-В – основні переваги та недоліки

Тролейбусам підтипу ІМС-В, не зважаючи на їх, наразі, найбільше поширення серед троллейбусів з АХ, все ж притаманні відповідні недоліки. Вони пов'язані з необхідністю за-

стосування автономних ДЕЕ у вигляді тягових АКБ. Адже, навіть за умови постійного вдосконалення їх конструкцій і навіть появи нових типів на протязі ось уже понад двох десятків років і доволі суттєве зменшення їх питомої маси та вартості, ці показники мають все ж дуже великий вплив на ринкову вартість тролейбусів цього підтипу.

Для забезпечення оптимальної величини автономного пробігу, необхідного для економічно доцільного застосування на міських та, особливо, приміських маршрутах, доводиться обладнувати тролейбуси ІМС-В тяговими АКБ відповідної енергопотужності. Навіть за умови забезпечення величини автономного пробігу до 20 км маса тягових АКБ при повній конструктивній масі тролейбусів 18000 кг, їх номінальна пасажиромістимість зменшується на 15 чол. А зі збільшенням енергопотужності тягових АКБ понад необхідну для забезпечення такого пробігу з метою подовження терміну їх експлуатації, вона зменшується ще на 7-10 чол. Тому, виробники таких ПТЗ ГК збільшують повну конструктивну у межах допустимої для обладнаних гібридними тяговими приводами, тобто до 19 500 кг.

Окрім того, тролейбуси з АХ, обладнані тяговими АКБ, за реалізаційними цінами проведених торгів через систему державних закупівель "Прозорро" [16] в 1,4-2,0 рази більші ніж класичних тролейбусів.

Тролейбуси підтипу ІМС-S – основні переваги та недоліки

На нинішній час обсяги виробництва та застосування тролейбусів з АХ, обладнаних тяговими СК, у системах міських перевезень пасажирів набагато нижчі ніж обладнаних тяговими АКБ, попри деякі відчутні переваги самих СК.

В першу чергу, йдеться про, щонайменше, у 4-5 разів більшу кількість циклів заряджання/розряджання і, відповідно, довший термін експлуатації тягових СК. Попри більшу масу тягових СК однакової енергопотужності та більшу вартість, саме завдяки цій перевазі, а також ширшому температурному діапазону і кращій експлуатації при низьких температурах, фірми-виробники все частіше вдаються до створення нових моделей або модифікацій тролейбусів підтипу ІМС-S. Адже, за оцінками багатьох досліджень, саме ці транспортні засоби серед тролейбусів з АХ на ниніш-

ній час мають найкращий показник питомої вартості їх експлуатації з урахуванням системи "тип тролейбуса – міська інфраструктура" за період життєвого циклу.

Що стосується недоліків, то вони такі ж як і у тролейбусів з АХ, обладнаних тяговими АКБ, тільки більш виражені. Адже маса тягових СК однакової енергопотужності та їх вартість більші, отже менша номінальна пасажиромістимість за однакових повних конструктивних мас цих підтипів тролейбусів.

Тролейбуси типу FC – основні переваги та недоліки

Паливні елементи, як автономні ДЕЕ для тролейбусів з АХ (а також електробусів), перебувають, все ще, на стадіях удосконалення конструкцій та підконтрольної експлуатації.

Звісно, що найбільш відпрацьовані на нинішній час водневі ПЕ характеризуються найбільшою, серед усіх типів автономних ДЕЕ, вартістю. Окрім того, вони потребують будівництва та розміщення у містах експлуатації тролейбусів з АХ типу FC заводів з виробництва водню та заправних станцій неподалік тролейбусних парків.

До інших недоліків таких тролейбусів з АХ відносяться значно менша номінальна пасажиромістимість при однакових повних конструктивних масах з класичними тролейбусами та набагато більша ринкова вартість.

Окрім того, тролейбуси типу FC, як і сучасні тролейбуси з ДГУ, додатково обладнуються ще й автономними тяговими АКБ, хоча й відносно невеликої енергопотужності.

Однією з важливих переваг цього підтипу ПТЗ ГК являється можливість забезпечення великої величини автономного пробігу без дозаправлення ПЕ на протязі денної експлуатації.

Вимоги та умови ескізного проектування тролейбусів вибраних типів

Для проведення порівняльного аналізу на основі розроблення ескізних проектів тролейбусів були вибрані тролейбус типу "Classic" (класичний) та тролейбуси з АХ підтипів ІМС-В, ІМС-S, а також тролейбус з ДГУ та тролейбус типу FC.

Розроблення ескізних проектів тролейбусів передбачало дотримання таких вимог:

– допустима повна маса тролейбусів – 18000 кг (аналогічна допустимій масі двомостових автобусів);

- колісна формула – 4x2.1 (одинарні колеса на тяговому мості);
- габаритні розміри кузова електробусів – довжина 11,0 м, ширина – 2,55 м, висота – 2,635 м;
- автономний хід тролейбусів з АХ – 20,0 км;
- застосування у ходових частинах і трансмісіях тролейбусів одних і тих же комплектувальних виробів, зокрема, однакових керованих і тягових мостів;
- застосування у ходових частинах тролейбусів незалежних підвісок одинарних коліс керованого та тягового мостів з пневматичними пружними елементами.

Таким чином, конструкції тролейбусів усіх прийнятих для проведення порівняльного аналізу типів та підтипів тотожні за винятком комплектувальних виробів систем автономних ДЕЕ. Частково відрізняються також і планування пасажирських салонів тролейбусів за рахунок різної кількості встановлених пасажирських сидінь. Але маса одинарного сидіння з підставкою складає

10...14 кг, тому масою кількох таких сидінь можна знехтувати.

Ескізні проекти тролейбусів досліджуваних типів

Базовий кузов тролейбусів усіх досліджуваних підтипів обладнаний відокремленим салоном. Для забезпечення зручного входу-виходу з салону передбачено двоє подвійних пасажирських дверей. Вхід до відділення водія – через окремі передні одинарні двері. Основні блоки тягових АКБ або СК тролейбусів підтипів ІМС-В та ІМС-S розміщуються та на дахах їх кузовів. Такі автономні ДЕЕ як ДГУ та водневі ПЕ, а також допоміжні блоки тягових АКБ тролейбусів з ДГУ та типу FC, розміщаються у задній частині їх кузовів біля лівої боковини. Кузови тролейбусів усіх типів та підтипів однакові.

Бокові проекції та планування пасажирських салонів розроблених ескізних проектів тролейбусів досліджуваних типів та підтипів наведені на рис. 1.

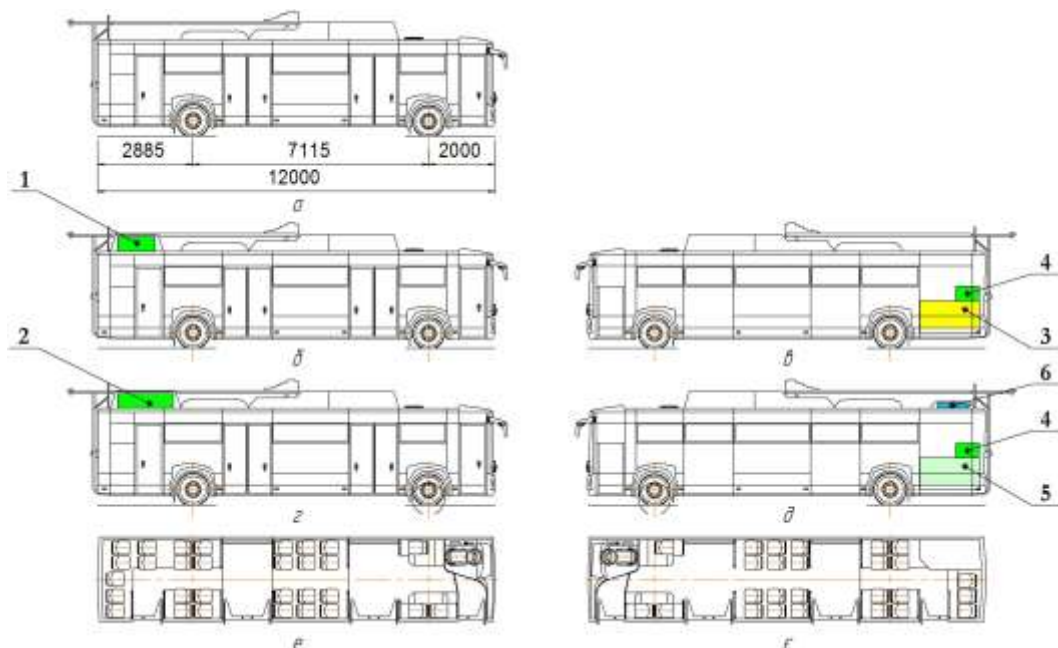


Рис. 1. Типи і підтипи тролейбусів: а) тип "Classic"; б) підтип ІМС-В; в) підтип ІМС-S; г) тип з ДГУ; д) тип FC; е) планування пасажирських салонів тролейбусів "Classic", ІМС-В та ІМС-S; є) планування пасажирських салонів тролейбусів з ДГУ та типу FC; 1 – основні блоки тягових АКБ; 2 – основні блоки тягових СК; 3 – ДВЗ; 4 – допоміжні блоки тягових АКБ; 5 – тяговий ПЕ; 6 – балон водневий

Визначення параметрів мас тролейбусів досліджуваних підтипів

До загальних параметрів мас тролейбусів будь-якого типу належать допустима повна

маса, маса у спорядженому стані, порожня маса та допустима маса пасажирів.

Для тролейбусів з АХ важливим параметром являється ще й маса комплектувальних

виробів систем автономного руху.

Вираз для визначення допустимої повної конструктивної маси міських тролейбусів можна записати у наступному вигляді:

$$M_{\Pi}^T = M_{\text{сп}}^c + \sum_{i=1}^n M_{\text{арі}} + m_{\text{вод}} + M_{\text{пас}} \leq [M_{\Pi}], \quad (1)$$

де $M_{\text{сп}}^c$ – споряджена маса базового тролейбуса з системою живлення від дводротової контактної мережі, кг; $\sum_{i=1}^n M_{\text{арі}}$ – маса комплектувальних виробів системи автономного руху, кг; $m_{\text{вод}}$ – розрахункова маса службової особи (водія), кг; $M_{\text{пас}}$ – маса пасажирів у відповідності до допустимої пасажировмістимості тролейбуса, кг; $[M_{\Pi}]$ – допустима повна конструктивна маса тролейбуса, кг.

Для проведення досліджень з умови збільшення терміну експлуатації покриття міських вулиць допустима повна маса тролейбусів прийнята рівною $[M_{\Pi}] = 18000$ кг, тобто допустимою для двомостових автобусів та вантажних автомобілів.

Маса комплектувальних виробів системи автономного руху тролейбусів з АХ складається з двох частин – маси системи заряджання автономних ДЕЕ та маси блоків автономних ДЕЕ:

$$\sum_{i=1}^n M_{\text{арі}} = m_{\text{сз}} + \sum_{i=1}^m m_{\text{дееі}}, \quad (2)$$

де $m_{\text{сз}}$ – маса комплектувальних виробів системи заряджання автономних ДЕЕ, кг; $\sum_{i=1}^m m_{\text{дееі}}$ – маса компонувальних виробів системи автономних ДЕЕ, кг.

Маса комплектувальних виробів системи заряджання автономних ДЕЕ приймається рівною $m_{\text{сз}} = 200$ кг для усіх типів і підтипів тролейбусів з АХ.

Для проведення досліджень споряджена маса базового міського тролейбуса класичного типу з довжиною кузова 12,0 м прийнята рівною $M_{\text{сп}}^{\text{бт}} = 11400$ кг.

Споряджена маса тролейбуса типу "Classic" визначається на основі статистичного аналізу довжини кузовів та спорядже-

них мас тролейбусів-аналогів вітчизняних та білоруських виробників (табл. 1).

Таблиця 1. Основні параметри тролейбусів типу "Classic"

| Модель | Довжина кузова, м | Споряджена маса, кг |
|--------------------|-------------------|---------------------|
| T701.17 "Богдан" | 11,96 | 11760 |
| T121.10 "Барвінок" | 12,0 | 10860 |
| T191.01 "Електрон" | | 11400 |
| МАЗ-103Т | | |
| МАЗ-203Т | | |
| БКМ-321 | 11,935 | 11100 |

Споряджена маса тролейбуса підтипу ІМС-В визначається за виразом:

$$M_{\text{сп}}^{\text{імс-в}} = M_{\text{сп}}^c + m_{\text{сз}} + m_{\text{акб}}, \quad (3)$$

де $m_{\text{акб}}$ – маса блоків тягових АКБ, кг.

Маса блоків тягових АКБ розраховується з умови достатньої енергопотужності для забезпечення заданого автономного пробігу між їх заряджанням під час руху від тролейбусної мережі [17]:

$$W_{\text{акб}} = \frac{\Delta w_m [M_{\Pi}]}{k_p^{\text{акб}}} L_{\text{ах}}, \quad (4)$$

де Δw_m – питома витрата енергопотужності тягових АКБ з урахуванням маси тролейбуса, кВт·год./кг·км; $k_p^{\text{акб}}$ – коефіцієнт допустимого розрядження тягових АКБ; $L_{\text{ах}}$ – величина автономного пробігу тролейбуса під час роботи на маршруті, км.

Середня питома витрата енергопотужності тролейбусами за даними досліджень становить $\Delta w_m = (0,08-0,09) \cdot 10^{-3}$ кВт·год./кг·км. Автономний пробіг тролейбусів підтипу ІМС-В (а також і підтипу ІМС-С) прийнятий рівним $L_{\text{ах}} = 20$ км.

Маса блоків тягових АКБ відповідного типу визначається за формулою:

$$m_{\text{акб}} = \frac{W_{\text{акб}}}{\rho_{\text{акб}}^w}, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{акб}}^w$ – питома енергопотужність тягових АКБ, кВт·год./кг.

З виразів (4) і (5) маса блоків тягових АКБ рівна:

$$m_{\text{акб}} = \frac{\Delta w_m [M_{\text{п}}] L_{\text{ак}}}{k_p \rho_{\text{акб}}^w} \quad (6)$$

Для сучасних літєвих тягових АКБ типу LiFePO_4 $\rho_{\text{акб}}^w = 0,09-0,10$ кВт·год/кг, а коефіцієнт $k_p^{\text{акб}} = 0,7-0,75$ (з умови подовження терміну експлуатації тягових АКБ).

Для проведення розрахунків прийнято $k_p^{\text{акб}} = 0,75$; $\rho_{\text{акб}}^w = 0,10$ кВт·год./кг та $\Delta w_m = 0,08 \cdot 10^{-3}$ кВт·год/кг·км. Розрахункова маса блоків тягових АКБ типу LiFePO_4 необхідної потужності для подолання в автономному режимі 20 км становить $m_{\text{акб}} = 410$ кг.

Отже, споряджена маса тролейбуса з АХ підтипу ІМС-В становить $M_{\text{сп}}^{\text{імс-в}} = 12010$ кг.

Споряджена маса тролейбуса підтипу ІМС-S визначається за виразом:

$$M_{\text{сп}}^{\text{імс-в}} = M_{\text{сп}}^c + m_{\text{сз}} + m_{\text{ск}}, \quad (7)$$

де $m_{\text{ск}}$ – маса блоків тягових СК, кг.

З виразу, аналогічного (4), отримуємо необхідну потужність блоків тягових СК:

$$W_{\text{ск}} = \frac{\Delta w_m [M_{\text{п}}]}{k_p^{\text{ск}}} L_{\text{ак}}, \quad (8)$$

де $k_p^{\text{ск}}$ – коефіцієнт допустимого розрядження тягових СК.

Коефіцієнт $k_p^{\text{ск}} = 0,8-0,85$ (з умови забезпечення гарантованого заданого автономного пробігу).

Енергопотужність блоків тягових СК, необхідна для подолання 20 км в автономному режимі, при $\Delta w_m = 0,08 \cdot 10^{-3}$ кВт·год/кг·км та $k_p^{\text{ск}} = 0,85$ становить $W_{\text{ск}} = 34$ кВт·год.

Для сучасних тягових СК, які застосовуються у конструкціях тролейбусів з АХ моделі S720V40-K7 [18] енергопотужністю 32 кВт·год. $m_{\text{ск}} = 1000$ кг.

Отже, споряджена маса тролейбуса підтипу ІМС-S рівна $M_{\text{сп}}^{\text{імс-с}} = 12600$ кг.

Споряджена маса тролейбуса з ДГУ, які обладнуються ДГУ та допоміжними блоками

тягових АКБ для зберігання надлишкової та рекуперативної електроенергії рівна:

$$M_{\text{сп}}^{\text{дгу}} = M_{\text{сп}}^c + m_{\text{сз}} + m_{\text{дгу}} + m_{\text{акб}}, \quad (9)$$

де $m_{\text{дгу}}$ – маса ДГУ з паливним баком і паливом, кг.

Маса ДГУ моделі P110-3, потужність якої 88 кВт (110 кВА) [19], рекомендованою українською компанією "Di Elcom Ukraine" для обладнання тролейбусів з АХ, становить 1350 кг.

Маса допоміжного блоку тягових АКБ енергопотужністю 10 кВт·год. типу LiFePO_4 рівна $m_{\text{акб}} = 110$ кг.

Отже, споряджена маса тролейбуса типу ДГУ рівна $M_{\text{сп}}^{\text{дгу}} = 12860$ кг.

Споряджена маса тролейбуса типу FC визначається за виразом:

$$M_{\text{сп}}^{\text{імс-fc}} = M_{\text{сп}}^c + m_{\text{сз}} + m_{\text{пе}} + m_{\text{об}} + m_{\text{акб}}, \quad (10)$$

де $m_{\text{пе}}$ – маса ПЕ, кг; $m_{\text{об}}$ – маса водневого балону, кг.

Маса ПЕ моделі "FCmove™-HD" [20], виробництва канадської компанії "Ballard Power Systems, Inc.", потужністю 70,0 кВт складає 250 кг.

Маса водневих балонів об'ємом 10 л, якого достатньо для подолання 125 км маршруту, рівна 10-16 кг.

Для тролейбуса з АХ типу FC прийнятий один балон з редуктором та іншими комплектувальними виробами сумарною масою 20 кг.

Маса допоміжного блоку тягових АКБ енергопотужністю 10 кВт·год типу LiFePO_4 рівна $m_{\text{акб}} = 110$ кг.

Отже, споряджена маса тролейбуса типу FC рівна $M_{\text{сп}}^{\text{дгу}} = 11780$ кг.

Допустима маса пасажирів визначається з виразу (1):

$$M_{\text{пасі}} = [M_{\text{п}}] - M_{\text{сп}}^{\text{тi}} - m_{\text{вод}}. \quad (11)$$

Розрахункові параметри мас тролейбусів досліджуваних типів та підтипів наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахункові параметри мас тролейбусів досліджуваних типів та підтипів

| Тип/ підтип тролейбуса | "Classic" | ДГУ | ІМС-В | ІМС-S | FC |
|--|-----------|-------|-------|-------|-------|
| Довжина кузова, м | 12,0 | | | | |
| Споряджена маса базового тролейбуса, $M_{ст}^c$, кг | 11400 | | | | |
| Маса системи автономних ДЕЕ, $\sum_{i=1}^m m_{дее_i}$, кг | - | 1660 | 610 | 1200 | 580 |
| Споряджена маса тролейбуса, $M_{пм}^e$, кг | 11400 | 13060 | 12010 | 12600 | 11980 |
| Допустима маса пасажирів, $M_{пас_i}$, кг | 6525 | 4865 | 5915 | 5325 | 5945 |

Визначення параметрів пасажировмістимості тролейбусів досліджуваних типів і підтипів

До параметрів пасажировмістимості тролейбусів відносяться загальна вмістимість, кількість пасажирських сидінь, встановлених у пасажирських салонах, та кількість пасажирів, які можуть перевозитись у стоячому положенні.

Номінальна пасажировмістимість тролейбусів обмежується двома параметрами:

- площею пасажирського салону, призначеною для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів;

- допустимою масою пасажирів.

Номінальна пасажировмістимість за допустимою масою пасажирів визначається за виразом:

$$N_{пас}^m \leq \frac{M_{пас_i}}{m_{пас}}, \quad (12)$$

де $m_{пас}$ – розрахункова маса пасажирів, кг.

Для міських тролейбусів, відповідно до вимог Правил ЕЭК ООН № 107, маса 1-го пасажирів $m_{пас} = 68$ кг.

Номінальна пасажировмістимість міських тролейбусів за площею пасажирського салону,

призначеною для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів визначається за виразом:

$$N_{пас}^s \leq n_{сид} + \frac{S_{ст}}{q_{пас}}, \quad (13)$$

де $n_{сид}$ – кількість одинарних пасажирських сидінь, встановлених у пасажирському салоні, од.; $S_{ст}$ – площа підлоги пасажирського салону, на якій можуть розміщатися пасажирів у стоячому положенні, м²; $q_{пас}$ – питома площа для розміщення 1-го стоячого пасажирів.

Для міських тролейбусів приймається $q_{пас} = 0,125$ м²/пас., що становить 8 пас./м² (максимальна величина).

Для тролейбусів розроблених ескізних проектів типів $S_{пс} = 11,6$ м² (визначена графічним способом).

Розрахункові параметри пасажировмістимості досліджуваних тролейбусів різних типів та підтипів, зокрема, номінальна вмістимість ($N_{пас}$), наведені у табл. 3.

Таблиця 3. Параметри пасажировмістимості міських тролейбусів різних типів і підтипів

| Тип/ підтип тролейбуса | "Classic" | ДГУ | ІМС-В | ІМС-S | FC |
|--|-----------|------|-------|-------|------|
| Допустима маса пасажирів, $M_{пас_i}$, кг | 6525 | 4865 | 5915 | 5325 | 5945 |
| Допустима пасажировмістимість, чол.: | | | | | |
| - за допустимою повною масою, $N_{пас}^m$ | 96 | 72 | 87 | 78 | 87 |
| - за площею пасажирського салону, $N_{пас}^s$: | 123 | 119 | 123 | | 119 |
| - кількість пасажирських сидінь | 30 | 26 | 30 | | 26 |
| - кількість стоячих пасажирів | 93 | | | | |
| Номінальна пасажировмістимість, $N_{пас}$, чол. | 96 | 72 | 87 | 78 | 87 |

Величина автономного ходу тролейбусів досліджуваних підтипів

Прийняті або допустимі розрахункові величини автономного ходу міських тролейбусів

різних типів та підтипів, наведені у табл. 4.

Середня величина автономного руху тролейбусів з ДГУ прийнята орієнтовно на основі інформації по таких тролейбусах.

Таблиця 4. Середній автономний хід міських тролейбусів

| Тип тролейбуса | "Classic" | ДГУ | ІМС-В | ІМС-S | FC |
|---------------------------------------|-----------|-----|-------|-------|-----|
| Автономний хід, $L_{а\delta}$, км | - | 70 | 20 | 20 | 125 |

Аналіз технічної досконалості міських електробусів різних типів

Для проведення порівняльного аналізу міських тролейбусів, ескізні проекти яких розроблені за умови дотримання принципу "при інших однакових умовах", вибрані найбільш характерні та визначальні конструктивні, а також експлуатаційні параметри:

- повна конструктивна маса;
- довжина кузова електробуса;
- номінальна пасажиромістимість;
- автономний пробіг без підзаряджання ДЕЕ або заправки паливного баку чи водневого балона тролейбусів типу ДГУ і FC, та відповідні критерії технічної досконалості їх конструкцій:

- коефіцієнти конструктивної ефективності тролейбусів – першого складника системи "міський тролейбус – необхідна інфраструктура": за порожньою масою, за довжиною кузова та за номінальною пасажиромістимістю;
- коефіцієнт експлуатаційної ефективності міських тролейбусів;
- коефіцієнт технічної досконалості конструкцій міських тролейбусів.

Коефіцієнти конструктивної ефективності тролейбусів різних типів та підтипів на основі виразу, наведеного в роботі [21], визначаються за порожньою масою:

$$E_k^{пм} = 1 - \frac{M_{пм}^T}{M_{п}^T}, \quad (14)$$

де $M_{пм}^T$ – порожня маса тролейбуса, кг; $M_{п}^T$ – повна конструктивна маса тролейбуса, кг; за номінальною пасажиромістимістю:

$$E_k^N = k_k \left(\frac{10^{-2} M_{п}^T}{N_{пас}} \right)^{-1}, \quad (15)$$

де k_k – розмірний коефіцієнт, кг /чол.; та за довжиною тролейбусів по кузову:

$$E_k^l = k_l \frac{N_{пас}}{10L_k}, \quad (16)$$

де k_l – розмірний коефіцієнт, м/чол.; L_k – довжина кузова тролейбуса, м.

Коефіцієнт експлуатаційної ефективності міських тролейбусів з АХ визначається за формулою:

$$E_{эф}^T = k_{эф} \frac{10^2 N_{пас} L_{ах}}{M_{п}^T}, \quad (17)$$

де $k_{эф}$ – коефіцієнт, кг/чол.·км.

Коефіцієнт технічної досконалості міських тролейбусів характеризує узагальнений коефіцієнт конструктивної, експлуатаційної та економічної ефективності:

$$E_{тд}^T = E_k^{пм} + E_k^l + E_k^N + E_{эф}^T - 1. \quad (18)$$

Розрахункові величини коефіцієнтів ефективності та технічної досконалості міських тролейбусів з АХ порівнюваних типів і підтипів наведені у табл. 5 та на рис. 2 і рис. 3.

Таблиця 5. Коефіцієнти ефективності та технічної досконалості міських тролейбусів різних підтипів

| Тип/ підтип тролейбуса | "Classic" | ДГУ | ІМС-В | ІМС-S | FC |
|---|-----------|------|-------|-------|------|
| Коефіцієнти конструктивної ефективності: | | | | | |
| - за порожньою масою, $E_k^{пм}$ | 0,36 | 0,27 | 0,33 | 0,3 | 0,33 |
| - за довжиною кузова, E_k^l | 0,53 | 0,4 | 0,48 | 0,43 | 0,48 |
| - за номінальною пасажиромістимістю, E_k^N | 0,8 | 0,6 | 0,73 | 0,65 | 0,73 |
| Коефіцієнт експлуатаційної ефективності, $E_{эф}^T$ | - | 0,28 | 0,1 | 0,09 | 0,6 |
| Коефіцієнт технічної досконалості, $E_{тд}^T$ | - | 0,55 | 0,64 | 0,47 | 1,14 |

Аналіз коефіцієнтів конструктивної ефективності (рис. 2) показує, що:

– серед розглянутих типів і підтипів міських тролейбусів з АХ найвищі коефіцієнти

конструктивної ефективності за порожньою масою, довжиною кузова та номінальною пасажировмістимістю мають тролейбуси підтипу ІМС-В та типу FC;

– коефіцієнти конструктивної ефективності тролейбуса з АХ підтипу ІМС-S менші відносно тролейбусів підтипу ІМС-В та типу FC на 110 %, 11,6 % та 112,3 %;

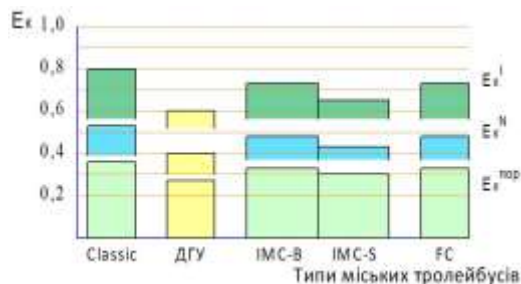


Рис. 2. Коефіцієнти конструктивної ефективності міських тролейбусів

– найнижчі показники коефіцієнтів конструктивної ефективності мають тролейбуси з АХ типу ДГУ, оскільки маса системи їх автономного ходу більша на 460-1080 кг.

На основі аналізу коефіцієнтів експлуатаційної ефективності міських тролейбусів розглянутих підтипів (рис. 3) впливає що:

– коефіцієнт експлуатаційної ефективності тролейбуса типу FC на 214 % вищий ніж тролейбуса ДГУ та у 6,0 і 6,7 рази більший ніж тролейбусів підтипів ІМС-В та ІМС-S.

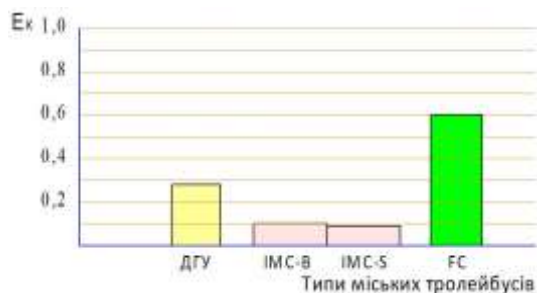


Рис. 3. Коефіцієнт експлуатаційної ефективності міських тролейбусів

За узагальненим коефіцієнтом технічної досконалості (рис. 4) абсолютна перевага належить тролейбусу з АХ типу FC, який на 178 % більший ніж у тролейбуса підтипу ІМС-В і понад 2 рази перевищує ці коефіцієнти тролейбусів типу ДГУ та підтипу ІМС-S.

Зрозуміло, що наведена оцінка технічної досконалості тролейбусів з АХ типу FC не враховує обсяги інвестиційних витрат, необхідних на будівництво заправних водневих станцій та заводів з виробництва водню.

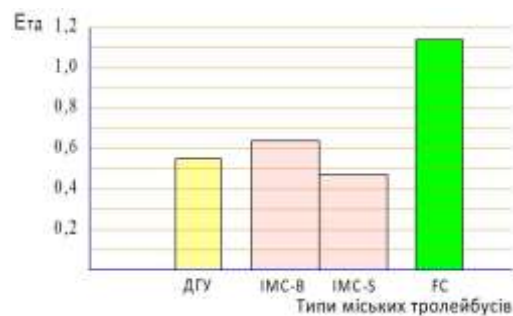


Рис. 4. Коефіцієнт технічної досконалості міських тролейбусів

Та все ж, запропоновані вирази (17) та (18) достатньо об'єктивно оцінюють технічну досконалість першої складової частини системи "міський тролейбус – інфраструктурна мережа" з огляду на експлуатаційну ефективність саме конструкцій тролейбусів з АХ різних типів та підтипів.

Висновки

Результати проведених досліджень з аналізу технічної досконалості міських тролейбусів з АХ розглянутих типів та підтипів на основі запропонованої методики порівняння їх основних технічних, експлуатаційних та економічних параметрів (при інших однакових параметрах) показують, що:

– з урахуванням нинішнього стану економічного розвитку України на найближчі 10-15 років пропонується проектування перспективних конкурентоспроможних міських тролейбусів підтипів ІМС-В (пріоритетний підтип) та ІМС-S;

– проектування, освоєння виробництва та експлуатація міських тролейбусів типу ДГУ являються не доцільними, хоча коефіцієнт їх експлуатаційної ефективності і вищий на 280-311 % ніж підтипів ІМС-В та ІМС-S, оскільки вони не являються повністю екологічно чистими;

– вибір тролейбусів з АХ підтипів ІМС-В або ІМС-S повинен базуватися на основі врахування усіх параметрів та умов тих чи інших маршрутів, на яких передбачається їх застосування;

– аналіз параметрів пасажировмістимості тролейбусів з АХ усіх типів та підтипів показує, що їх пасажировмістимість за площею пасажирського салону на 32-47 чол. більша ніж допустима за допустимою масою пасажирів.

Загалом, проектування перспективних

конкурентоспроможних міських тролейбусів повинно здійснюватися на засадах:

- застосування методів модульного проектування тролейбусів з АХ на основі аналогічних методів проектування міських електробусів;
- застосування принципів максимальної уніфікації конструкцій тролейбусів з АХ та перспективних і конкурентоспроможних міських електробусів;
- оптимізації параметрів довжини кузова тролейбусів з АХ підтипів ІМС-В або ІМС-S та їх номінальної пасажировмістимості і величини автономного руху.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Hutyria, S., Chanchin, A., Yaglinskiy, V., Khomiak, Y. & Popov, V. (2020). Evolution of trolley-bus: directions, indicators, trends. *Diagnostyka*. 21(1). 11-26. <https://doi.org/10.29354/diag/116080>.
2. Grygara, D., Kohania, M., Štefůn R. & Drgoňab, P. (2019). Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses. *Transportation Research Procedia*. 40. 229-235. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146519301966>.
3. Pustiulhal, S., Samchuk V., Dembitsky, V., Samostian V. & V. Prydiuk, V. (2021). Construction of the geometrical models of a multiple-factor optimization of the technical and operating parameters of the trolleybuses with an autonomous move margin. *Communications*. 24 (1). 29-40. <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.1.B29-B40>.
4. Bartłomiejczyk, M., Hrbac, R., Styskala, V. & Połom, M. (2013). Trolleybus with traction batteries for autonomous running. The 7th International Scientific Symposium ELECTROENERGETIKA. Stara Lesna, Slovak Republic, 9, 2013. 18-20. Retrieved from: <https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/4181/ee13-proceedings.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
5. Bartłomiejczyk, M. & Połom, M. (2021). Possibilities for Developing Electromobility by Using Autonomously Powered Trolleybuses Based on the Example of Gdynia. *Energies*. 14. 23. <https://doi.org/10.3390/en14102971>.
6. Bartłomiejczyk, M. (2017). Autonomous Battery Drive in Trolleybuses: an Overview of Practical Examples. Proceedings of 21st International Scientific Conference. TRANSPORT MEANS 2017. 19-24. Retrieved from: https://mostwiedzy.pl/pl/publication/download/1/autonomous-battery-drive-in-trolleybuses-an-overview-of-practical-examples_23190.pdf
7. Bartłomiejczyk, M. & Połom, M. (2021). Sustainable Use of the Catenary by Trolleybuses with Auxiliary Power Sources on the Example of Gdynia. *Infrastructures*. 6, 61. 17. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6040061>.
8. Wołek, M., Szmelter-Jarosz, A., Koniak, M. & Golejewska, A. (2020). Transformation of Trolleybus Transport in Poland. Does In-Motion Charging (Technology) Matter? *Sustainability*. 12, 9744. 25. <https://doi.org/10.3390/su12229744>.
9. Galaverna M., Geneva, R. & Sciutto, G. (1998). Present and future prospects for trolleybuses in Italy. *Transactions on the Built Environment*. 33. 13-21. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/UT98/UT98002FU.pdf>.
10. Tomar, A. S., Veenhuizen, B. P. A., Buning, L. & Pyman, B. (2019). Viability of traction battery for battery-hybrid trolleybus. 32nd Electric Vehicle Symposium (EVS32) Lyon, France, May 19-22, 2019. 13. <https://www.researchgate.net/publication/334051064>.
11. Polom, M., Piasecki, A. & Bartłomiejczyk, M. (2015). Charakterystyka autonomności trolejbusow – nowe doświadczenia w elektromobilności miejskiej [Characteristics of the autonomy of trolleybuses – new experiences in urban electromobility]. *Logistics*. 4. 5394-5401. *Logistyka*. 4. 5394-5401. [in Poland].
12. Infrastructure for in motion charging trolleybus systems. (2021). UITP. International Association of Public Transport. 8. Retrieved from: https://www.google.com/url?esrc=s&q=&rct=j&sa=U&url=https://www.uitp.org/publications/infrastructure-in-motion-charging-trolleybus/&ved=2ahUKEwjC_qLKyeV5AhX5hJUCHbnTAKgQFnoECAgQA&usg=AOvVaw3uAvyb2XBxIjcwksiIyts.
13. The Trolleybus as an Urban Means of Transport in the Light of the Trolley Project. (2016). Edited by Wołek, M. & Wyszomirski. 168. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/274698417_The_Trolleybus_as_an_Urban_Mean_s_of_Transport_in_the_Light_of_the_Trolley_Project.
14. Połom, M. (2021). Technology Development and Spatial Diffusion of Auxiliary Power Sources in Trolleybuses in European Countries. *Energies*. 21, 3040. 18. <https://doi.org/10.3390/en14113040>.
15. Romana, L. (2011). D5.2.6 The potential of buses and trolleys. Aalto university school of science and technology. 15. Retrieved from: <http://gemfinalreport.fi/files/D5.2.6%20The%20potential%20of%20buses%20and%20trolleys.pdf>.
16. Лягушкин А., Янківський Д. Поставки тро-

- лейбусов в Украине: заказчики, поставщики, цены. Закупка новых троллейбусов через тендеры в "Прозорро". *Пассажирский транспорт* : веб-сайт. (2019). Lyagushkin A., Yankivskij D. Postavki trol-lejbusov v Ukraine: zakazchiki, postavshiki, ceny. Zakupka novykh trollejbusov cherez ten-dery v "Prozorro" [Deliveries of trolleybuses in Ukraine: customers, suppliers, prices. Purchase of new trolleybuses through tenders in "Prozorro". Passenger transport: website]. Retrieved from: <https://traffic.od.ua/blogs/antonlyagushkin/1218483>.
17. Войтків, С. В. (2022). Аналіз технічної досконалості міських електробусів різних типів. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання. Харків : ХНАДУ. 21. С. 64-78. Voitkiv, S. V. (2022). Analiz tekhnichnoi doskonalosti miskykh elektrobisiv riznykh typiv [Analyzing technical perfection of city electric buses of various types]. Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii: Elektronne naukove spetsializovane vydannia. Kharkiv : KhNADU. 21. 64-78. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.03>.
 18. Ultra capacitor system for city bus. Shanghai Aowei Technology Development Co., Ltd. Retrieved from: <http://www.aowei.com/en/uploads/product/20181210/15444198843256.pdf>.
 19. Модернизация троллейбусов с заменой системы управления тяговым двигателем и установкой дизель-генератора. Modernizatsiya trolleybusov s zamenoy sistemyi upravleniya tyagovym dvigatelem i ustanovkoy dizel-generatora [Modernisation of trolleybuses with replacement of controlsystem by a hauling engine and setting of diesel-generator]. Retrieved from: <http://dielcom.com.ua/dielcom.com.ua/files/Trolleybus.pdf>. [in Russian].
 20. Fuel Cell Power Module for Heavy Duty Motive Applications. Ballard Power Systems, Inc. Retrieved from: https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcmovetm.pdf?sfvrsn=77ebc380_4.
 21. Войтків, С. В. (2021). Шляхи покращення економічних показників перспективних міських електробусів. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання. Харків: ХНАДУ. 14(4), 12-21. Voitkiv, S. V. (2018). Shliakhy pokrashchennia ekonomichnykh pokaznykiv perspektyvnykh miskykh elektrobisiv [Ways of improving economic indicators of high-potential city electric buses]. Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii: Elektronne naukove spetsializovane vydannia. Kharkiv : KhNADU. 14(4), 12-21. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2018.14.0.12/>

Войтків Станіслав Володимирович¹, к.т.н., генеральний конструктор, voitkivsv@ukr.net, тел. +38 067-447-04-90, ORCID: 0000-0002-7789-2081

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

Analyzing technical perfection of city trolleybuses of autonomous running

Abstract. Problem. Trolleybus transport, as one of the types of environmentally friendly transport, is used to transport passengers in more than 280 cities of many countries around the world. In the 20th century, along with traditional trolleybuses, trolleybuses with autonomous running are becoming more and more widely used. However, in our country of trolleybuses with autonomous running, manufactured by Ukrainian enterprises, only four copies undergo operational tests. **Goal.** The goal is evaluation of the technical excellence of city trolleybuses of various types and the selection of the optimal type of trolleybuses with autonomous running for the design and organization of small-scale production at enterprises of Ukraine and their further operation on city and suburban routes. **Methodology.** The choice of the type of promising competitive city trolleybus with autonomous running for the domestic conditions of economic development is based on the analysis of the technical parameters of trolleybuses of various types, the sketch designs of which are developed on the basis of the maximum identity of their structures and the economic parameters of the "type of trolleybus - necessary infrastructure" systems. **Results.** Five versions of sketch projects of city trolleybuses of various types have been developed, an analysis of their structural and operational parameters has been carried out, and a relative assessment of the economic parameters of the "trolleybus - necessary infrastructure" system has been given. **Originality.** A method of analyzing the technical perfection of trolleybuses of various types, the sketch designs of which are developed on the basis of the application of the principle of "other things being equal", i.e., under the conditions of ensuring the maximum identity of their structures, is proposed. **Practical value.** The practical value is the reasoned selection of the type of city trolleybus for the design of promising competitive models or modifications that are most suitable for use in urban and suburban passenger transportation systems at this stage of economic development of Ukraine.

Key words: trolleybus transport; type of trolleybus; technical perfection of the trolleybus; passenger capacity of the trolleybus; mass parameters of the trolleybus; autonomous mileage; city infrastructure.

Voytkiv Staniskav¹, Cand. of Science, General Designer, voitkivsv@ukr.net, тел. +38 067-447-04-90, ORCID: 0000-0002-7789-2081

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