

DOI: 10.30977/VEIT.2024.26.0

ISSN: 2226-9266



АВТОМОБІЛЬ І ЕЛЕКТРОНІКА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ



**ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ
СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ
ВИДАННЯ**

ВИПУСК

26

ХАРКІВ

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кафедра автомобільної електроніки

Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології

**Електронне наукове фахове видання
(друкована версія)**

26/2024

**Vehicle and Electronics.
Innovative Technologies**
Electronic scientific professional edition
(printed version)

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2024.26.0

Харків 2024

Журнал засновано в 2011 р. кафедрою Автомобільної електроніки, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

ISSN: 2226-9266

DOI: 10.30977/VEIT.2024.26.0

Випуск сформовано 12.12.2024.

В журналі публікуються матеріали теоретичних та практичних досліджень присвячених перспективним напрямкам розвитку автомобільної електроніки, впровадженню та удосконаленню гібридних автомобілів та електромобілів, моделюванню транспортних процесів і систем, інформаційним технологіям й інтелектуальним системам на транспорті, сучасним технологіям діагностики систем і агрегатів транспортних засобів, а також методичним дослідженням підготовки спеціалістів у сфері транспорту.

Журнал також включає матеріали доповідей учасників Всеукраїнської науково-методичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку вищої освіти в Україні».

Затверджено: Вченою радою університету від 25.03.2011, протокол № 8

Журнал включено до **Переліку електронних наукових фахових видань України, категорія «Б» за спеціальностями – 113, 121, 122, 133, 151, 274, 275**, наказом Міністерства освіти і науки України № 612 від 07.05.2019 та **141, 142**, наказом Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019.

Спеціальності: 113 - Прикладна математика
 121 - Інженерія програмного забезпечення
 122 - Комп'ютерні науки
 133 - Галузеве машинобудування
 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 274 - Автомобільний транспорт
 275 - Транспортні технології (за видами)
 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 142 - Енергетичне машинобудування

Редакційна колегія

Головний редактор: Дзюбенко Олександр Андрійович, к.т.н., доц.

Заступник головного редактора: Аргун Щасяна Валіковна, д.т.н., проф.

Відповідальний секретар: Трунова Ірина Сергіївна, к.т.н., доц.

Члени редколегії: Абрамчук Ф. І. (д-р техн. наук, проф.), Алексієв О. П. (д-р техн. наук, проф.), Бажинов О. В. (д-р техн. наук, проф.), Батигін Ю. В. (д-р техн. наук, проф.), Богаєвський О. Б. (д-р техн. наук, проф.), Богомолів В. О. (д-р техн. наук, проф.), Вдовиченко В. О. (канд. техн. наук, доц.), Волков В. П. (д-р техн. наук, проф.), Воронков О. І. (д-р техн. наук, проф.), Врублевський О. М. (д-р техн. наук, проф.), Гнатів А. В. (д-р техн. наук, проф.), Гурко О. Г. (д-р техн. наук, проф.), Горбачов П. Ф. (д-р техн. наук, проф.), Двадненко В. Я. (д-р техн. наук, проф.), Далека В. Х. (д-р техн. наук, проф.), Клименко В. І. (д-р техн. наук, проф.), Клец Д. М. (д-р техн. наук, проф.), Колодяжний В. М. (д-р фіз.-мат. наук, проф.), Корогодський В. А. (д-р техн. наук, проф.), Мигаль В. Д. (д-р техн. наук, проф.), Михалевич М. Г. (канд. техн. наук, доц.), Наглюк І. С. (д-р техн. наук, проф.), Нагорний Є. В. (д-р техн. наук, проф.), Ніконов О. Я. (д-р техн. наук, проф.), Подригало М. А. (д-р техн. наук, проф.), Полянський О. С. (д-р техн. наук, проф.), Сараєв О. В. (д-р техн. наук, проф.), Смирнов О. П. (д-р техн. наук, проф.), Солодов В. Г. (д-р техн. наук, проф.), Тропіна А. А. (д-р техн. наук, проф.), Чаплигін Є. О. (канд. техн. наук, доц.), Шуклінов С. М. (д-р техн. наук, проф.), Янюгін Є. Г. (д-р техн. наук, проф.)

Адреса редакції: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Автомобільний факультет, Кафедра автомобільної електроніки, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002,

Тел.: (057) 707-36-96;

e-mail: ae.hnadu@gmail.com

Статті друкуються в авторській редакції. Редакція не несе відповідальності за орфографічні, стилістичні чи інші помилки, допущені автором публікації.

ЗМІСТ

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ
СИСТЕМАМИ. СИНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ЕКОМОБІЛІВ**

Володимир Сістук

Аналіз доступності громадського транспорту для гірничопромислових районів міста Кривий Ріг.....6

Михайло Тараненко, Галина Мигаль, Наталія Кобріна, Ігор Тараненко

Управління якістю планування міських пасажирських транспортних систем.....17

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ І
ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ**

Руслан Багач, Андрій Гнатов, Щасяна Аргун

Інтеграційне моделювання зарядного контролера LTC4020 для літій-іонних акумуляторів.....25

**ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Юрій Бороденко

Система електродинамічного ретардери подвійної дії.....36

Щасяна Аргун, Володимир Двадненко, Андрій Гнатов

Оптимізація системи управління буферною літій-залізо-фосфатною акумуляторною батареєю.....44

Станіслав Войтків

Проект багатосекційних зчленованих трамвайних вагонів на основі інноваційної компонувальної схеми55

CONTENT

INTELLIGENT TRANSPORT MANAGEMENT SYSTEMS. SYNERGETIC SYSTEMS OF ECO-VEHICLES

Volodymyr Sistuk

Analysis of public transport accessibility for mining districts of Kryvyi Rih.....6

Mykhaylo Taranenko, Galyna Mygal, Nataliia Kobryna, Igor Taranenko

Management of quality for planning of city passenger transportation systems.....17

MODELING APPLIED TASKS IN AUTOMOBILE INDUSTRY AND TRANSPORT SYSTEMS

Ruslan Bahach, Andrii Hnatov, Shchasiana Arhun

Simulation modeling of the LTC4020 charging controller for lithium-ion batteries.....25

WAYS TO IMPROVE THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF MOTOR VEHICLES. ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

Yuriy Borodenko

Double-action electrodynamic retarder system.....36

Shchasiana Arhun, Vladimir Dvadnenko, Andrii Hnatov

Optimized control system for a booster lithium-iron-phosphate battery.....44

Stanislav Voytkiv

The project of multi-section articulated tram cars based on an innovative layout scheme.....55

Аналіз доступності громадського транспорту для гірничопромислових районів міста Кривий Ріг

Сістук В. О.

Криворізький національний університет

Анотація. Робота присвячена аналізу доступності громадського транспорту (ДГТ), який обслуговує гірничопромислові райони міста із лінійною планувальною структурою. Дослідження ґрунтується на транспортному моделюванні в PTV Visum та зборі даних для оцінки змін у транспортному попиті у місті Кривий Ріг за період 2021–2024 років. У моделі виокремлено п'ять транспортних районів з найбільшою кількістю робочих місць за КВЕД В як основних гірничопромислових районів. ДГТ оцінювалася за часом у дорозі, з аналізом отриманих ізохрон доступності для кожного з гірничопромислових районів та зупинок ГТ, які їх обслуговують. Для аналізу пішохідної доступності відповідних зупинок враховано довжину примикань ГТ та площу району. Запропоновано практичні заходи для підвищення ефективності ГТ у Кривому Розі.

Ключові слова: транспортна доступність, пішохідна доступність, громадський транспорт, транспортне моделювання, гірничопромисловий район, PTV Visum, ізохрона доступність.

Вступ

Місто Кривий Ріг має поліцентричну та лінійну забудову, де районні центри набувають більшого значення; ділова активність концентрується переважно в гірничодобувній, металургійній та переробній промисловості, підприємства якої розташовані вздовж магістральних транспортних осей (автодороги та залізничній колії швидкісного трамваю), які проходить з півдня на північ. Таким чином, довжина селітивної зони міста перевищує 60 км, тоді як її ширина на окремих ділянках становить менше 5 км.

Лінійна планувальна структура для міст, в яких економічна діяльність розподілена вздовж транспортної осі, спрямована на забезпечення найвищого рівня доступності для населення прилеглих районів і сільської місцевості. Водночас, повздовжні транспортні зв'язки суттєво збільшуються, погіршується доступність віддалених від центру районів. Тому лінійна структура просторового розвитку одночасно вимагає впровадження швидкісного транспорту. В якості такої системи транспорту для Кривого Рогу виступає швидкісний трамвай. Крім того, деякі маршрути кому-

нальних автобусів функціонують для забезпечення швидкого сполучення між віддаленими районами міста, зупиняючись лише на зупинках громадського транспорту (ГТ), які характеризуються великим пасажирообміном.

Масовий пасажирський транспорт відіграє значну роль у забезпеченні переміщення великої кількості людей до місць прикладання праці у місті з лінійною планувальною структурою.

Гірничозбагачувальні та металургійні підприємства є основними місцями цілі та зародження робочих поїздок у Кривому Розі. Доступність ГТ та зупинок, які обслуговують дані промислові райони є вкрай важливою. Розташування у планувальній структурі міста, рівень забезпеченості маршрутами ГТ, ритмічність роботи ГТ, рівень завантаженості зупинок ГТ, пішохідний доступ до таких зупинок, – всі перелічені фактори формують доступність гірничопромислових районів та у сукупності впливають на можливість працівників гірничо-металургійного комплексу здійснювати робочі поїздки на ГТ.

Доступність громадського транспорту (ДГТ) є одним із ключових показників роботи

міської транспортної системи при оцінці ефективності надання транспортних послуг населенню [1].

Аналіз публікацій

Проблематика ДГТ є предметом значної уваги в науковій літературі. Відповідно до [1], ДГТ поділяється на три типи: доступ до зупинок (станцій), мереж і заходів. Дослідники виявили кілька впливів і взаємозв'язків між ДГТ, навколишнім середовищем і повсякденним життям, які можуть визначати, наприклад, здоров'я та інші аспекти життя людей. Крім того, підкреслюється зв'язок між ДГТ та можливостями працевлаштування [2]. Дослідження [1] оцінює доступ до послуг ГТ на станціях, враховуючи час пішохідного руху до станцій та час очікування. Автори також розглядають конфігурацію системи транспорту та навколишнє середовище станцій. Для визначення важливості станцій в інтегрованій системі представлений індекс центральності станцій (ІЦС), що є комбінацією гравітаційної моделі та індексу центральності складних мереж.

Автори [3] розробили концептуальну основу та якісну методологію для аналізу доступності, зосередивши увагу на зв'язку між щоденним досвідом людей та ДГТ.

У статті [4] адаптовано модель просторово-часової доступності STA (space-time accessibility) для ГТ - PT-STA (public transport space-time accessibility), щоб враховувати порогові значення часу в дорозі.

У роботі [5] було розроблено метод оцінки ДГТ, що охоплює різні рівні аналізу — від окремих елементів, таких як зупинки, до комплексного аналізу мережі, з використанням географічної інформаційної системи (ГІС).

Результати дослідження [6] свідчать, що оптимальною кількістю кластерів для аналізу індексу ДГТ у великих містах є шість кластерів при використанні алгоритмів кластеризації.

У [7] виконано дослідження системи ДГТ, приділивши особливу увагу швидкісному автобусному сполученню. Оцінка проводилася з використанням концепції міста 5, 10 і 15 хвилин і спиралася на відкриті просторові дані.

У роботі [8] виконано аналіз ДГТ для людей з особливими фізичними потребами шляхом вимірювання показника індексу доступ-

ності (ІД), який розраховується на основі загального часу доступу (ЗЧД) та еквівалентної частоти відвідувань (ЕЧД).

У дослідженні [9] ДГТ розглядається як сукупність трьох основних компонентів: (1) охоплення поїздки – ГТ вважається доступним, якщо він забезпечує можливість досягти місця відправлення або прибуття; (2) просторове охоплення – транспорт є доступним, коли він знаходиться в межах раціональної фізичної близькості до місця проживання чи призначення; та (3) часове охоплення – послуга вважається доступною, якщо вона надається в той період, коли людина бажає здійснити поїздки.

Показник ДГТ, що вирізняється врахуванням наявності та якості пішохідних маршрутів, які сполучені із зупинками ГТ, є індикатором рівня обслуговування ГТ TLOS (transit level of service) [10]. Метод також інтегрує щільність населення та робочих місць з просторовими та часовими параметрами для оцінки ДГТ. Особливістю TLOS є можливість виявлення взаємозв'язку між безпекою й комфортом пішохідних маршрутів до зупинок ГТ.

У керівництві [11] надано додаткову інформацію щодо оцінки ДГТ на рівні зупинок, зокрема, доступу велосипедистів до ГТ. Запроваджено додатковий показник надійності перевезень на ГТ – надлишковий час очікування. Доступність зупинок ГТ також досліджувалась у роботах [12-13].

Незважаючи на велику кількість наукових праць, присвячених дослідженню ДГТ, вивчення доступності ГТ, що обслуговує гірничопромислові райони міста з лінійно-розосередженою планувальною структурою, не здійснювалося.

Таким чином, аналіз ДГТ, який обслуговує, у тому числі, гірничопромислові райони міста з лінійно-розосередженою структурою є актуальним науково-практичним завданням.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є проведення комплексного аналізу доступності громадського транспорту (ДГТ) як показника транспортної пропозиції для гірничопромислових районів міста з лінійно-розосередженою забудовою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити закономірності зміни транспортної пропозиції та попиту на ГТ у місті Кривий Ріг за період 2021 – 2024 р.;

– визначити показники транспортної доступності основних гірничопромислових районів міста Кривий Ріг;

– провести аналіз транспортної доступності зупиночних зон ГТ, які обслуговують основні гірничопромислові райони міста Кривий Ріг;

– визначити показники пішохідної доступності зупинок ГТ, які обслуговують основні гірничопромислові райони міста Кривий Ріг;

– розробити рекомендації з покращення ДГТ, який використовується для обслуговування основних гірничопромислових районів міста Кривий Ріг.

Методика дослідження

Методологія комплексного аналізу ДГТ як індикатора транспортної пропозиції для гірничопромислових районів міста Кривий Ріг ґрунтується на транспортному моделюванні у програмному забезпеченні PTV Visum [14].

Модель пасажирського транспорту міста Кривий Ріг включає модель мережі, чотирирокову модель попиту на перевезення та модель їхньої взаємодії. Модель пропозиції ГТ включає 3013 примикань для громадського транспорту, 534 зупинки, 1165 зупиночних зон, 1190 зупиночних пунктів, 130 маршрутів та 218 маршрутних напрямків. Відповідно до пар цілей поїздок сформовано 14 сегментів попиту. Детальне описання транспортної моделі представлено у роботі [15].

Для врахування змін, які відбулись на ГТ за період 2021 – 2024 р., оновлені показники добових обсягів перевезень на всіх маршрутах ГТ відповідно до звітів з електронних транспортних карток пасажирів та розклади руху на маршрутах, де відбулись зміни у розкладі. Також враховано питання запровадження нового маршруту та виключення з мережі окремих маршрутів.

Підприємства видобувної промисловості та розробці кар'єрів розосереджені по всій території міста. Показники ДГТ є особливо актуальними для тих транспортних районів, в яких кількість робочих місць у гірничовидобувному комплексі є найвищою серед інших районів (для Кривого Рогу – понад 7 тисяч робочих місць). У транспортній моделі Кривого Рогу виявлено п'ять таких районів, у подальшому будемо застосовувати до них означення «основні гірничопромислові райони». Як видно із рис.1, дані райони розосереджені по транспортній мережі міста.

ДГТ основних гірничопромислових районів та зупинок ГТ, які обслуговують дані райони, визначалась на основі показника, який враховує місцезнаходження об'єкту. Подібні показники широко використовуються в дослідженнях ДГТ завдяки їхній зрозумілості, теоретичній обґрунтованості та доступності вихідних даних [16] та включають такі компоненти: місце походження, доступні можливості або привабливість пунктів призначення певного типу в потенційних локаціях, а також вартість поїздки між пунктами.

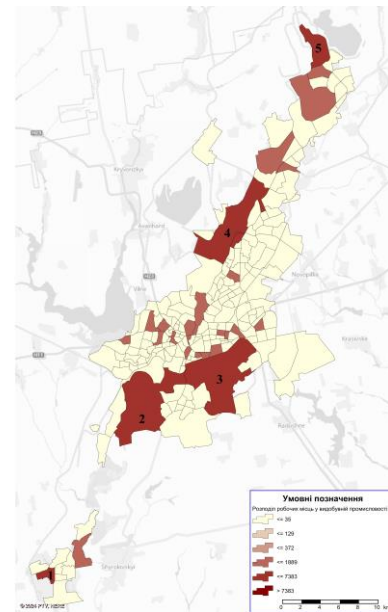


Рис. 1. Основні гірничопромислові райони міста Кривий Ріг відповідно до розподілу кількості робочих місць у видобувній промисловості та розробці кар'єрів

Пропонується відображати вартість поїздки між об'єктами не через мережеву відстань або відстань по повітряній лінії між ними, а через час у дорозі [16]:

$$A_{in} = \sum_{j=1}^m g(W_{jn}) \cdot c_{ij} \quad (1)$$

де i – номер локації зародження поїздки (зупинка ГТ, транспортний район); j – номер локації потенційного призначення поїздки (зупинка ГТ, транспортний район); m – кількість зв'язків зародження-призначення; n – кількість локацій у системі; W – ваговий коефіцієнт можливості поїздки; c_{ij} – вартість поїздки між локаціями i та j .

Доступність A_{in} визначається як сума добуток двох функцій, одна з яких відповідає можливостям, а інша – вартості поїздки.

Остання представляє собою функцію просторового спаду й називається функцією опору.

Вартість проїзду c_{ij} розраховується на основі модельного перерозподілу попиту на ГТ у програмі PTV Visum.

Основною процедурою перерозподілу попиту на ГТ у місті Кривий Ріг є процедура на основі інтервалів (*Headway-based*). Це пояснюється тим, що до 65% обсягу пасажирських перевезень у місті приходиться на приватні автобусні маршрути, які працюють з інтервалами руху до 30 хв.

Функція повного опору при використанні перерозподілу ГТ за інтервалами включає час поїздки PJT (*perceived journey time*), та компонент, що враховує тариф за проїзд або долю контрольних пунктів оплати за проїзд:

$$IMP = \alpha \cdot PJT + \beta \cdot FP \quad (2)$$

де IMP – показник повного опору, PJT – сприйнятий час поїздки, α , β – коефіцієнти, FP – тариф за проїзд.

Функція повного опору розраховується відповідно до рівняння:

$$IMP = \lambda_1 \cdot IVT + \lambda_2 \cdot RIT + \lambda_3 \cdot ACT + \lambda_4 \cdot EGT + \lambda_5 \cdot WKT + \lambda_6 \cdot OWT + \lambda_7 \cdot TWT + \lambda_8 \cdot NTR, \quad (3)$$

де IVT – час, проведений у транспортному засобі, RIT – час у дорозі між початковою та кінцевою зупинками, ACT – час пішохідного руху до початкової зупинки, EGT – час руху пішки від зупинки до останнього місця призначення, WKT – загальний час руху пішки, OWT – час очікування на першій зупинці, TWT – час очікування пересадки, NTR – кількість пересадок, λ_1 – λ_8 – коефіцієнти функції загального опору.

Значення коефіцієнтів λ_1 – λ_8 функції загального опору, які були використані у моделі Кривого Рогу, наведено у роботі [15].

У Кривому Розі на маршрутах приватних перевізників діє фіксований тариф, а на маршрутах комунального транспорту з 2021 року запроваджено безоплатну систему проїзду для резидентів міста.

PTV Visum не передбачає процедури «прямого» моделювання фіксованих тарифів. У зв'язку з цим, був розроблений метод моделювання фіксованого тарифу для транспортної моделі Кривого Рогу у програмному забезпеченні PTV Visum, а саме, рішення через зональну матрицю From-To Zone Matrix. Ідея

останнього методу полягає у тому, що створюється одна тарифна зона, яка використовується для позначення всіх зупинок (за допомогою відповідного атрибуту), а також матриця тарифів, що складається лише з одного елемента. Ціна проїзду вказується при налаштуванні типу білету з урахуванням зональної матриці From-To Zone Matrix (рис.2).

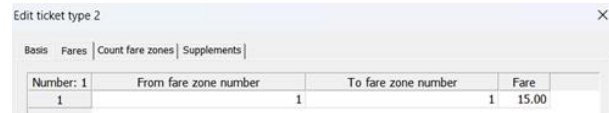


Рис. 2. Конфігурація типу білету

Результати розрахунку функції повного опору зберігаються у матрицях витрат ГТ (*skim matrices of time*) для кожного з 14 шарів попиту, які охоплюють всі транспортні райони.

Більш детальне описання процедур моделювання перерозподілу попиту на ГТ на основі інтервалів у транспортній моделі Кривого Рогу представлено у роботі [15].

Для аналізу та графічного відображення доступності гірничопромислових районів, зупинок ГТ, зупиночних пунктів у межах заданого часового інтервалу застосовані відповідні ізохрони доступності ГТ.

Транспортна ДГТ визначається на основі пошуку сполучень за розкладом, який може здійснюватися за інтервалом часу відправлення або прибуття [14].

У першому випадку аналізуються всі сполучення, що відправляються з обраного об'єкта мережі протягом заданого періоду, з урахуванням додаткового часового проміжку, який вказується після вибору періоду відправлення та стосується часу, за який сполучення повинно досягти пункту призначення.

У другому випадку розглядаються всі сполучення, які прибувають до вибраного об'єкта мережі протягом певного періоду, із зазначенням часу випередження – це проміжок часу, який передує визначеному періоду прибуття, протягом якого сполучення має залишити початкову точку [14].

Аналіз доступності та розташування зупинок транспорту допомагає виявити проблемні зони, такі як невіддале розташування, нестача зупинок чи незручний доступ. На основі цього можна створити плани вдосконалення мережі для поліпшення зручності та обслуговування пасажирів.

Доступність зупинок у мережі можливо оцінити за довжиною примикань ГТ у моделі,

оскільки довжина примикання визначається доступом до зупинки по повітряній лінії як відстань між геометричним центром транспортних районів і тими вузлами мережі, які пов'язані із зупинками.

У п.10.4.9 ДБН [17] вказано, що у промислових зонах нормативна відстань підходу пасажирів до зупинки ГТ становить 400 м від прохідних підприємств. Даний норматив не можна застосовувати для оцінки доступності зупинок ГТ, які обслуговують гірничопромислові райони, зважаючи на їх великі площі, тому з цією метою пропонується новий показник – «коефіцієнт обмеженості доступності зупинки» C_s як відношення:

$$C_{si} = l_{cputmax}/S_{zi} \\ 0 < C_{si} < 1, \quad (4)$$

де $l_{cputmax}$ – максимальна довжина примикання ГТ у i -тому транспортному районі; S_{zi} – площа i -го транспортного району.

Чим менше значення C_s , тим ефективніше розміщення зупинки ГТ та простіше доступ до неї з гірничопромислового району.

Закономірності зміни транспортної пропозиції та попиту

Протягом 2022 – 2024 років цивільна інфраструктура міста Кривий Ріг зазнала значних пошкоджень через обстріли. Проте, стан доріг і зупинок ГТ покращився після ремонтів. Безпека рухомого складу залишилась на довоєнному рівні, але доступність транспорту у вечірню пору доби погіршилась.

За період 2021 – 2024 років на маршрутах ГТ виникли такі основні зміни:

- введено безоплатний проїзд на комунальному транспорті (2021 р.) для резидентів міста;
 - введено нові розклади руху на громадському транспорті (для комунального транспорту) та інтервали руху (для приватних перевізників);
 - введено в експлуатацію новий маршрут автобусу №8;
 - виключені з маршрутної мережі пасажирського транспорту маршрути, які не користуються попитом;
 - запроваджено цифрову платформу та мобільний додаток «Зручний маршрут» [18], що забезпечує планування поїздок і інформацію про розклад і затримки.
- Також було проведено тестування додатку

«Зручний маршрут» для оцінки можливостей покращення ДГТ. Попри значні переваги додатку, які дозволяють підвищити інформованість користувачів ГТ, оперативність інформації, що надається, можливість відслідкувати зміни у розкладі ГТ, врахувати варіанти поїздки з пересадками, тестування показало основні проблеми, які виникають при роботі з додатком: не завжди коректно відображаються зупинки ГТ, іноді відсутній ярлик для позначення зупинки на карті та виникають помилки у геолокації при відсутності руху.

Для оцінки змін у попиті на ГТ проведено аналіз даних про пасажиропотоки на маршрутах ГТ, отриманих на основі обробки щоденних звітів про транзакції з системи «Картка криворіжця» (Центр електронних сервісів, комунальне підприємство Криворізької міської ради) за кожен день роботи рухомого складу на маршруті [19]. Звіти охоплювали період з 6 листопада 2023 року по 12 листопада 2023 року (листопад та березень є найбільш репрезентативними місяцями для транспортних досліджень [20]). Також отримано вичерпні дані про пасажиропотоки для системи ГТ, включно з електротранспортом, за грудень 2023 року. Ці дані стосуються таких міських транспортних систем, як автобуси, швидкісний трамвай, трамваї, тролейбуси та маршрутки.

Встановлено, що у порівнянні з 2021 р., на комунальних автобусних маршрутах обсяги перевезених пасажирів збільшились на 240%, тролейбусних маршрутах – 102%, трамваєм – 101%. Пасажиропотоки на маршрутах швидкісного трамваєм зменшились на 58%, маршрутного таксі – на 28%.

Закономірності зміни транспортної пропозиції були враховані у транспортній моделі Кривого Рогу при її оновленні, а транспортного попиту – при калібруванні пасажиропотоків на ГТ у моделі.

Показники транспортної доступності основних гірничопромислових районів

Критерієм ДГТ у даному випадку є показник часу у дорозі для прибуття до кожного з визначених гірничопромислових районів за період часу з 06:00 до 23:00 години доби.

Ізохрони доступності ГТ представлені на рис. 3 – рис. 7. Максимальна кількість пересадок при пошуку шляху – 5.

Найменшою ДГТ за показником часу у дорозі характеризується гірничопромисловий

район 1 на ж/м Інгулець (рис.3). Дістатись даного району на ГТ з інших районів міста можливо за період часу у дорозі не менше 1 год. 20 хв., що не відповідає нормативному значенню витрат часу для міст від 500 до 800 тис. осіб у 40 хв. [17].

Гірничопромисловий район 3 має найбільшу ДГТ: з центральних районів міста до нього можна дістатися за час, що не перевищує 30 хв. (рис.5).

Район 2 характеризується низьким рівнем ДГТ: час прибуття з центральних районів міста громадським транспортом становить понад 1 годину 10 хв., що свідчить про недостатню ефективність транспортного сполучення, зважаючи на близькість до району 3 (рис.4).

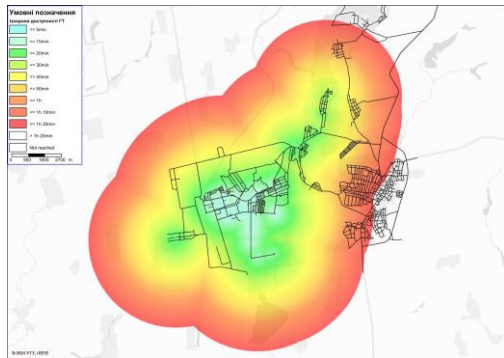


Рис. 3. Ізохрона ДГТ для обслуговування гірничопромислового району 1

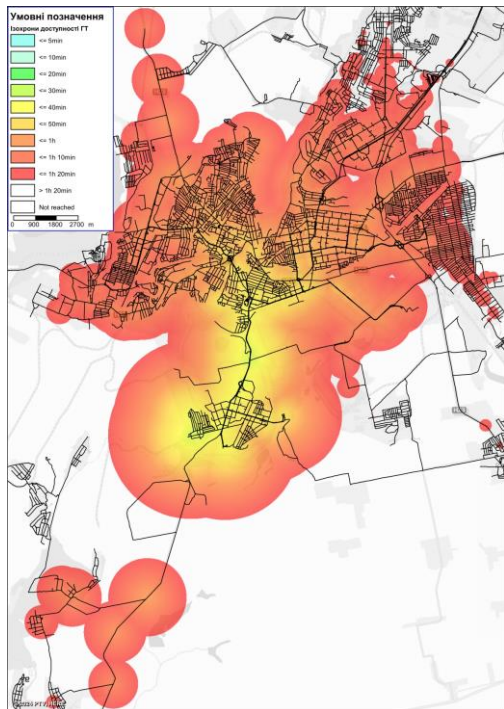


Рис. 4. Ізохрона ДГТ для обслуговування гірничопромислового району 2

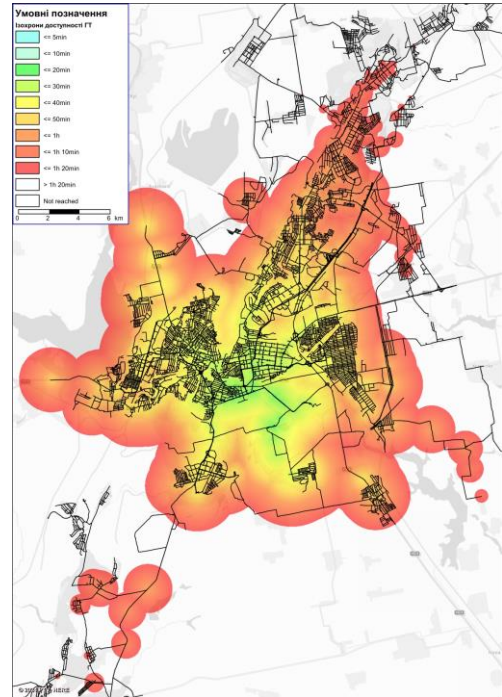


Рис. 5. Ізохрона ДГТ для обслуговування гірничопромислового району 3

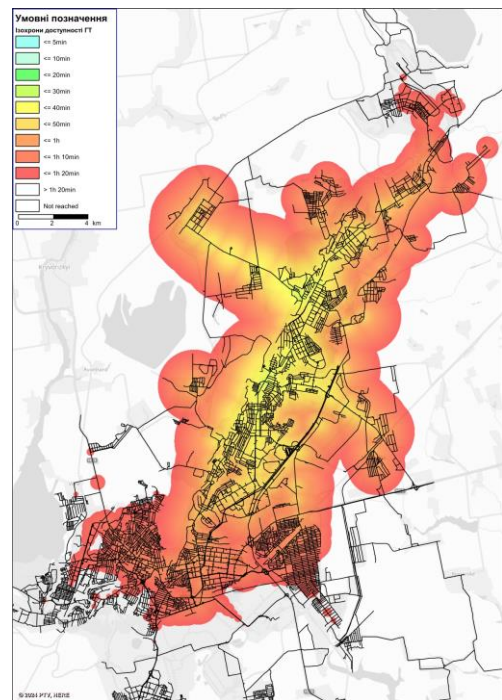


Рис. 6. Ізохрона ДГТ для обслуговування гірничопромислового району 4

Порівняно з іншими гірничопромисловими районами міста, район 4 має відносно високу транспортну доступність, оскільки зона ДГТ для нього покривається часом прибуття з найбільш віддалених частин міста в межах 1 год. 20 хв. Водночас мінімальний час у дорозі для прибуття до цього району з цент-

ральних частин міста досить значний й становить 40 хв. (рис. 6).

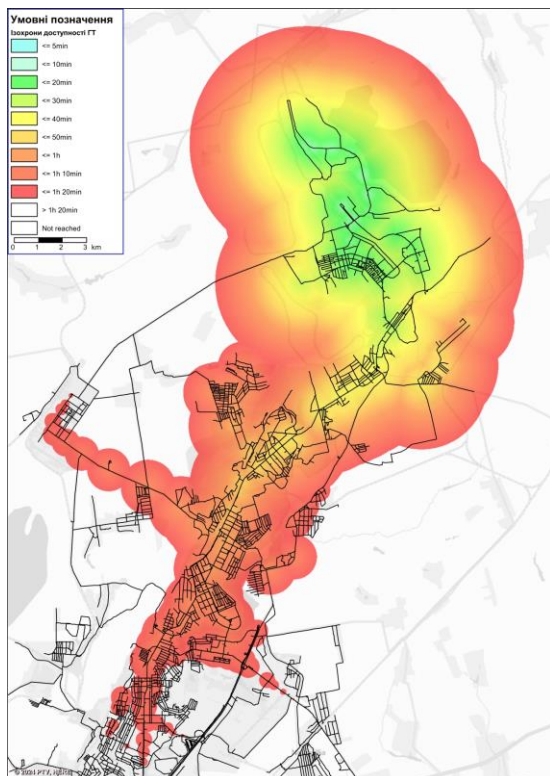


Рис. 7. Ізохрона ДГТ для обслуговування гірничопромислового району 5

У межах гірничопромислового району 5 рівень ДГТ є високим – до 20 хв. Проте для сполучення з іншими районами міста, зокрема з сусіднім Покровським адміністративним районом, цей показник значно гірший і складає до 1 год. 20 хв. що також не відповідає [17] (рис.7).

На основі аналізу отриманих ізохрони ДГТ стає очевидним, що лінійно-розосереджена форма плану міста значно впливає на доступність його гірничопромислових районів. Найбільш віддалені райони навіть при прямому сполученні з іншими районами міста не мають показника ДГТ на рівні нижче 1 год. 20 хв. Велику роль відіграє швидкісний трамвай, що дозволяє мешканцям міста дістатись з багатьох частин міста до гірничопромислового району 3 за менше ніж 30 хв.

Показники транспортної доступності зупинок ГТ основних гірничопромислових районів

Для визначення часу прибуття до зупиночної зони відповідного гірничопромислового району за період часу з 06:00 до 23:00 години доби з інших зупиночних зон також був використаний інструмент графічного аналізу PTV Visum у вигляді ізохрон доступності зон зупинок ГТ.

Результати порівняльного аналізу ізохрон доступності районів (рис. 3 – рис. 7) та зупиночних зон засвідчили, що рівень ДГТ для даних зон в межах цих самих районів є значно вищим, ніж безпосередньо для самих районів. Для прикладу на рис.8 показана ізохрона доступності зони зупинки «станція Кривий Ріг» (гірничопромисловий район 3).

Показники ДГТ для районів та зупиночних зон від інших частин міста представлені у таблиці 1.

Таблиця 1. ДГТ до гірничопромислових районів та зупинок ГТ

Номер гірничопромислового району	Назва основної зупиночної зони	Час прибуття з центральних частин міста у район	Час прибуття з центральних частин міста у зону зупинки
1	вул. Рудна	більше 1 год. 20 хв.	більше 1 год. 20 хв.
2	вул. Польова	1 год. 10 хв.	40 хв.
3	станція Кривий Ріг	30 хв.	10 – 20 хв.
4	ЦГЗК ЦГЗТ	40 хв.	30 хв.
5	УКК ПівнГЗК	1 год. 20 хв.	1 год.

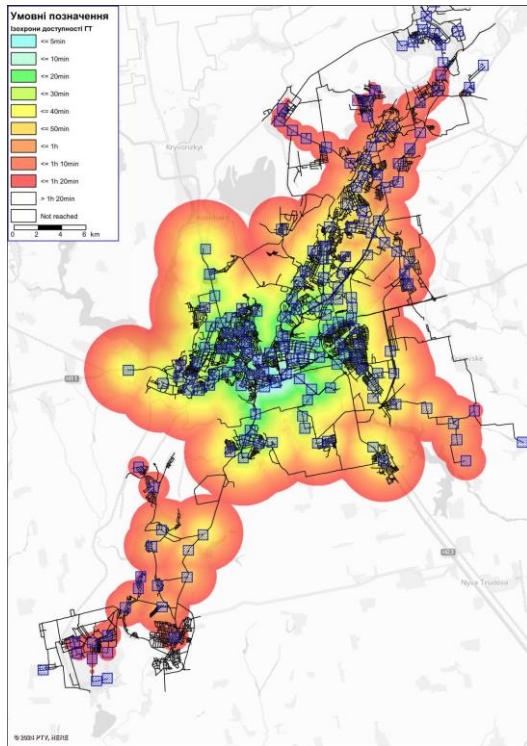


Рис. 8. Ізохрона ДТТ для зони зупинки «станція Кривий Ріг» у гірничопромисловому районі 3

Показники пішохідної доступності зупинок ГТ

Вулично-дорожня мережа Кривого Рогу характеризується слабкою доступністю зупинок ГТ. Лише 25% від всіх відстаней до зупинок ГТ від центрів районів мають нормативну довжину до 400 м, що визначено на основі аналізу довжини примикань ГТ.

Пішохідна доступність зупинок ГТ, які обслуговують основні гірничопромислові райони визначалась шляхом: 1) оцінки довжини примикань ГТ від конкретного транспортного (гірничопромислового) району до відповідної зупинки та 2) визначення коефіцієнту обмеженості доступності за формулою (4). У розробленій моделі примикання підключаються лише до вузлів, які також є вузлами доступу до зупинок. У такому випадку кожен маршрут починається і закінчується пішохідним відрізком на примиканнях, а в межах зупинки прямує до її початкової точки, без використання відрізків транспортної мережі.

Для кожного з гірничопромислових районів визначені зупинки (табл. 2), для яких довжина примикання ГТ буде максимальною.

Таблиця 2. Пішохідна доступність зупинок ГТ гірничопромислових районів

Номер гірничопромислового району	Найбільш віддалені від центру району зупинки	Максимальна відстань до зупинки, км	Площа району	Обмеженість доступності зупинок
1	вул. М. Міхновського	0,97	2,0	0,485
2	вул. Руднична	4,80	29	0,165
3	Станція Кривий Ріг	2,68	30	0,090
4	СУ 453	5,42	21	0,258
5	РЗФ-2	1,90	7,0	0,271

У відповідності до значень довжини примикань ГТ та площі відповідних гірничопро-

Серед розглянутих гірничопромислових районів мінімальна відстань до зупинки ГТ спостерігається для району 1 (житловий масив «Інгулець»), однак одночасно площа даного району є найменшою серед усіх інших гірничопромислових районів, відповідно, значення обмеженості доступності зупинок – найбільшим. Максимальна відстань до зупинки ГТ – у районі 2, в той час як мінімальна обмеженість доступності зупинки – у районі 3 (ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»).

мислових районів визначені коефіцієнти обмеженості доступності зупинок (табл. 2).

Обговорення та рекомендації

ГТ у Кривому Розі зазнає численних викликів, пов'язаних з умовами воєнного часу, зокрема, через нестачу водіїв, що обмежує можливість ущільнення графіків руху. Зазначені виклики спричиняють значний вплив на можливості покращення ДТГ.

Для підвищення ефективності ГТ у частині його доступності, що обслуговує основні гірничопромислові райони міста Кривий Ріг, доцільно розглянути такі заходи:

1. Збільшення швидкості сполучення на маршруті автобусу 302 для зменшення часу поїздки до житлового масиву Інгульця;

2. Можливість розробки додаткового маршруту ГТ до ж/м Південний ГЗК для підвищення рівня ДГТ до гірничопромислового району 2;

3. Перегляд місцезоташування зупинок ГТ у районах Інгульця та у Тернівському районі (Даманський та ПрАТ Північний ГЗК);

4. Перегляд розкладів руху тролейбусів для усунення ущільнення інтервалів проходження зупиночних пунктів маршрутами тролейбусу на їх спільних ділянках, яке призводить до співпадіння або малий інтервал між часом прибуття на зупиночний пункт або/та відправлення із зупиночного пункту рухомого складу різних маршрутів тролейбусів та, відповідно, практично одночасне проходження ними дублюючої ділянки, а також призводить до порушення інтервалу проходження між контрольними зупиночними пунктами для різних графіків на одному маршруті.

Висновки

У роботі проведено аналіз доступності ДГТ як показника транспортної пропозиції для гірничопромислових районів міста Кривий Ріг з лінійно-розосередженою забудовою із урахування змін у роботі його ГТ за період 2021–2024 р.р.

За даний період для покращення транспортного обслуговування в Кривому Розі запроваджено безоплатний проїзд для мешканців, нові розклади та маршрути, усунуто малопопулярні напрямки, а також створено цифрову платформу «Зручний маршрут».

Результати транспортного моделювання у програмному забезпеченні PTV Visum показали, що лінійно-розосереджена структура міста Кривий Ріг суттєво впливає на доступність його гірничопромислових районів, і навіть при прямому сполученні з іншими районами час поїздки ГТ не зменшується нижче 1 год. 20 хв. для найбільш віддалених районів.

Аналіз отриманих ізохрон доступності підтвердив, що рівень ДГТ та площа доступності у межах заданого часового діапазону для зупиночних зон районів більші, ніж для самих районів.

Для оцінки пішохідної доступності гірничопромислових районів вперше запропоновано коефіцієнт обмеженості доступності зупинки, який враховує відстань до зупинки від

центру відповідного транспортного району та площу даного району. Відповідно до розрахунків, найбільше значення даного коефіцієнту отримано для гірничопромислового району 1, найменше – для району 3, що означає найвищу доступність зупинок ГТ в районі 3 серед усіх гірничопромислових районів міста, якщо враховувати площу даних районів.

Для підвищення ефективності громадського транспорту в гірничопромислових районах Кривого Рогу пропонується:

1. Збільшити швидкість сполучення автобуса 302 до житлового масиву Інгулець.

2. Розробити додатковий маршрут до житлового масиву Південний ГЗК для покращення доступності району 2.

3. Переглянути розташування зупинок у районах Інгульця, Даманський, ПрАТ Північний ГЗК.

4. Оптимізувати розклади руху тролейбусів для усунення ущільнення інтервалів на спільних ділянках маршрутів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на удосконалення маршрутної мережі пасажирського транспорту міста Кривий Ріг з урахуванням дослідженої специфіки доступності гірничопромислових районів, зупинок ГТ даних районів та пішохідної доступності зупинок у даних районах.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Yang, R., Liu, Y., Liu, H., & Gan, W. (2019). Comprehensive public transport service accessibility index— a new approach based on degree centrality and gravity model. *Sustainability*, 11(20):5634. <https://doi.org/10.3390/su11205634>
2. Saif, M. A., Zefreh, M. M., & Torok, A. (2019). Public transport accessibility: a literature review. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 47(1), 36–43. <https://doi.org/10.3311/PPtr.12072>
3. Tiznado-Aitken, I., Lucas, K., Muñoz, J.C., & Hurtubia, R. (2020). Understanding accessibility through public transport users' experiences: A mixed methods approach. *Journal of Transport Geography*, 88, 102857.
4. Dianin, A., Gidam, M., & Hauger, G. (2024). Measuring public transport accessibility to

- fixed activities and discretionary opportunities: a space–time approach. *European Transport Research Review*, 16, 9. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00636-2>
5. Moridpour, S., Pour, A. T., & Saghapour, T. (2019). Big data analytics in traffic and transportation engineering: emerging research and opportunities. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7943-4>
 6. Su, H., Li, M., Zhong, X., Zhang, K., & Wang, J. (2023). Estimating public transportation accessibility in metropolitan areas: a case study and comparative analysis. *Sustainability*, 15(17):12873. <https://doi.org/10.3390/su151712873>
 7. Hardi, A. Z., Hardi, A. Z. & Murad, A. A. (2023). Spatial analysis of accessibility for public transportation, a case study in Jakarta, bus rapid transit system (Transjakarta), Indonesia. *Journal of Computer Science*, 19(10), 1190-1202. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2023.1190.1202>
 8. Verseckienė, A., Meškauskas, V., & Batarlienė, N. (2016). Urban public transport accessibility for people with movement disorders: the case study of Vilnius. *Procedia Engineering*, 134, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.038>
 9. Mamun, S., & Lownes, N. (2011). A composite index of public transit accessibility. *Journal of Public Transportation* 14(2), 69-87.
 10. Ryus, P., Ausman, J., Teaf, D., Cooper, M., & Knoblauch, M. (2000). Development of Florida's transit level-of-service indicator. *Transportation Research Record*, 1731, 123-129.
 11. Ryus, P., Danaher, A., Walker, M., Foster, N., Carter, B., Ellis, E., Cherrington, L., & Bruzzone, A. (2013). *Transit capacity and quality of service manual*, 3rd ed. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/24766>
 12. Corazza, M. V., & Favaretto, N. (2019). A Methodology to Evaluate accessibility to bus stops as a contribution to improve sustainability in urban mobility. *Sustainability*. 11. 803.
 13. Kaszczyszyn, P., & Sypion, N. (2019). Walking access to public transportation stops for city residents. A comparison of methods. *Sustainability*. 11. 13.
 14. PTV VISUM user manual. (2023). Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2694.
 15. Sistuk, V. (2024). A comparative study of headway-based and transport system-based assignments of public transport in Visum: the city of Kryvyi Rih case. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 124, 173-184. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.124.12>
 16. Verduzco, T., J.R., & McArthur, D.P. (2024). Public transport accessibility indicators to urban and regional services in Great Britain. *Scientific Data*, 11, 53. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02890-w>
 17. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. (2019). *Український державний науково-дослідний інститут проектування міст «Діпромісто» імені Ю.М.Білоконя*. ДБН В.2.2-12:2019. Planuvannya ta zabudova terytorii. (2019). *Ukrainskyi derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut proektuvannya mist «Dipromisto» imeni Yu.M.Bilokonja*. [DBN В.2.2-12:2019. Planning and development of territories. (2019). *Ukrainian State Research Institute of Urban Design “Dipromisto” named after Yurii Bilokon*]. [in Ukrainian].
 18. Портал Криворіжжя. (30.10.2024). *Portal Kryvorizhtsia* (30 October 2024). [Portal of Kryvyi Rih resident]. <https://krcer.dp.ua/mobilnyj-dodatok> [in Ukrainian].
 19. Центр адміністративних послуг "Віза" ("Центр Дії"). (30.10.2024). *Tsentr administratyvnykh posluh "Viza" ("Tsentri Dii")*. (30 October 2024). [Center for administrative services "Viza" ("Center Diia")]. <https://viza.kr.gov.ua/#/> [in Ukrainian].
 20. Методичні рекомендації з моделювання транспортних потоків під час оцінювання ефективності проектних рішень щодо дорожньої інфраструктури. (2023). *ДП «HIPI»*. *Metodychni rekomendatsii z modeliuвання transportnykh potokiv pid chas otsiniuvannya efektyvnosti proiektnykh rishen shchodo dorozhnoi infrastruktury*. (2023). *DP «NIRI»*. [Methodological recommendations for modeling traffic flows in assessing the effectiveness of design solutions for road infrastructure. (2023). *State*

Enterprise “National Institute of Infrastructure Development” (SE “NIID”)].
[in Ukrainian].

Сістук Володимир Олександрович¹, к.т.н., доцент кафедри автомобільного транспорту, sistuk@knu.edu.ua, тел. +38 0987-614-099, ORCID: 0000-0003-4907-4265

¹Криворізький національний університет, 50027, Україна, м. Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11.

Analysis of public transport accessibility for mining districts of Kryvyi Rih

Abstract. Problem. Mining and processing plants, along with a metallurgical plant, serve as the primary destinations and origins for work trips in Kryvyi Rih. The transport and pedestrian accessibility of public transport (PT) and its stops in these industrial areas are crucial, particularly given the city's linear planning structure characterized by scattered mining districts and economic activities concentrated along the main transport axis. Despite the extensive body of literature focused on PT accessibility, there has yet to be a study specifically examining the accessibility of PT for mining districts within a city that features a linear and dispersed planning structure. **Goal.** The aim of this study is to perform a comprehensive analysis of public transport accessibility (PTA) as an indicator of transport supply for the mining districts (zones) within the city's linearly dispersed urban structure. **Methodology.** The methodology for this comprehensive analysis of PTA relies on transport

modeling using PTV Visum software, along with the collection of baseline data to evaluate shifts in transport demand in Kryvyi Rih from 2021 to 2024. Five zones with the highest job concentrations, as defined by Ukrainian Classification of Economic Activities B, were identified. PTA indicators were calculated for both the zones and their serving stops, with travel time set as the primary accessibility criterion, analysed through a comparison of accessibility isochrones. Given the large spatial extent of the mining zones, pedestrian accessibility to these stops is proposed to be evaluated based on the length of PT connectors and the area of each zone within the model. **Originality.** The study introduces, for the first time, the "limited accessibility of stops" indicator, defined as the ratio of the length of PT connectors to the area of the corresponding zones within the model. This indicator aims to account for the pedestrian accessibility of mining district's stops. **Practical value.** Proposed practical measures aim to enhance PT efficiency in terms of accessibility within a city characterized by a linearly dispersed planning structure.

Key words: transport accessibility, pedestrian accessibility, public transport, transport modeling, mining district, PTV Visum, accessibility isochrones

Sistuk Volodymyr¹, Associate Professor, Ph.D, Automobile Transport Department, sistuk@knu.edu.ua, tel. +38 0987-614-099, ORCID: 0000-0003-4907-4265,

¹Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusevich str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.

Управління якістю планування міських пасажирських транспортних систем

Тараненко М. Є.¹, Мигаль Г. В.², Кобріна Н. В.¹, Тараненко І. М.¹

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М.Є Жуковського “ХАІ”

² Національний університет “Львівська політехніка”

***Анотація.** У статті обґрунтована необхідність створення математичних моделей керування якістю пасажирської транспортної системи (МПТС) у залежності від мети її реалізації. Оригінальність дослідження міститься у комплексному та системному підході до визначення та формулювання кількісних показників властивостей. Для цього запропоновано склад пріоритетних властивостей системи, сформульовано набір показників властивостей, визначено їх розмірні чи відносні значення. Практична значущість полягає у можливості використання для розрахунків паспортних даних та відомих емпіричних залежностей для складових системи, які досліджуються. Поставлена мета досягнута та вирішені поставлені задачі.*

Ключові слова: міська транспортна система, показники якості, математичне моделювання, гнучкість, надійність, ергономічність, економічна ефективність.

Вступ

Міські пасажирські транспортні системи (МПТС) великих міст являють собою сукупність складних підсистем, які тісно взаємопов'язані одна з іншою. У зв'язку з ростом міст складність таких систем збільшується. Це призводить до необхідності використання математичного апарату мережевих рішень. У свою чергу, це потребує синтезу багаточленних математичних моделей, які адекватно описують процеси в системах та підсистемах, та дозволяють управляти якістю функціонування для цільової оптимізації. Математичні моделі повинні комплексно враховувати різноманітні властивості всієї системи, а також підсистем та процесів, які складають її сутність. Для кількісної оцінки властивостей слід встановити показники (критерії) цих властивостей. При цьому бажано, щоб такі показники несли фізичний сенс та мали розмірність.

Аналіз публікацій

В останній час з'явилась низка публікацій, які присвячені плануванню міських транспортних маршрутів та їх якості [1-6, 7, 8]. У їх

більшості можна прослідкувати наступні особливості:

- некомплексність розглянутих властивостей МПТС;
- основна увага зосереджена на властивості “комфортність перевезення пасажирів”;
- показник цієї властивості формується на основі соціологічних опитувань та використовуються прості шкали типу “Так або Ні”, “Погано-Задовільно-Добре”.

У роботах [1, 2] для оцінки якості МПТС використовується кваліметричний підхід. Для отримання комплексного показника якості використовується функція згортки окремих групових показників у вигляді їх добутку. При цьому коефіцієнт вагомості записано у вигляді ступеню i -го показника властивості, що різко зменшує вплив на значення комплексного показника. Значення коефіцієнту вагомості, які визначені за результатами опитування пасажирів, знаходяться у межах $0,001 \dots 0,12$.

У роботі [1] розглянуто декілька, суттєвих за думкою авторів, груп властивостей МПТС: рівень задоволення зупинками, якість інформаційного забезпечення, якість графіку руху, тривалість знаходження пасажирів у транспортному засобі та оцінка роботи пер-

соналу.

У роботі М. Руденко [4] приведено послідовність методу оцінки якості перевезень пасажирів (у розглянутому випадку на залізничному транспорті), характерна для усіх видів пасажирського транспорту:

- визначення критеріїв оцінювання, складання переліку показників;
- підготовка експертів;
- оцінка експертами якості та вагомості властивостей;
- агрегація результатів;
- аналіз результатів та прийняття рішення.

Автори роботи [6] привели низку показників транспортних засобів, включаючи показники транспортної роботи, забруднення оточуючого середовища, а також необхідність використання кваліметричного підходу до оцінки якості МПТС. Подібна пропозиція розглянута також у роботах [9-11].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є формування теоретичних підходів до комплексної теоретичної оцінки якості МПТС та її компонентів для оптимізації її функціонування в залежності від поставлених цілей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- ☞ синтезувати комплексну кількісну матмодель керування якістю планування МПТС;
- ☞ обґрунтувати склад та розмірність пріоритетних показників якості системи та їх кількісні параметри.

Актуальність роботи обумовлена постійно зростаючими вимогами до якості пасажирських перевезень, появою різних видів транспортних сполучень, підвищеними вимогами до безпеки, економічності та екологічності перевезень пасажирів та різноманітними формами власності на транспортні організації.

Систематизація властивостей МПТС та системи “водій-автомобіль-дорожнє середовище” (ВАДС)

Для оцінки комплексів властивостей компонентів ВАДС та оптимізації системи у цілому в залежності від заданої мети необхідно враховувати дуже велику кількість властивостей. Спростити аналіз та систематизувати властивості системи можливо за рахунок штучного членування системи на окремі підсистеми та з початку систематизувати їх вла-

стивості окремо одну від іншої. На це вказує наступна обставина. Часто одна властивість підсистеми трактується для другої підсистеми по іншому. Наприклад, властивість “надійність” для водія автомобіля розуміється як комплекс властивостей безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збереженості. У той же час для підсистеми “людина” (водій, пасажир, пішохід) ця властивість трактується інакше. Наприклад, для пасажирів надійність це впевненість його доставки з початкового пункту до кінцевого у наперед визначений час. Пріоритетність однакових за назвою властивостей для різних підсистем системи може бути різною.

Наприклад, для водія, як одного з представників підсистем системи, пріоритетними можуть бути групи властивостей:

- фактично реалізованих властивостей автомобіля. Для більшості цих властивостей відомі кількісні показники якості [6];
- ергономічних властивостей, які реалізовані з урахуванням принципів інженерії людського фактору, включаючи антропометричні властивості, ступінь інтелектуалізації транспортного засобу. Більшість цих властивостей можливо оцінити кількісно;
- групи економічних властивостей, які визначають заробіток водіїв;
- безпеки, екологічності та інші властивості.

Для пасажирів транспортного засобу пріоритетними можуть бути:

- властивість надійності перевезень;
- властивість безпеки поїздки або впевненості з великим ступенем вірогідності прибуття у потрібне місце у розрахунковий час;
- ергономічні властивості, які реалізуються у процесі поїздки.

Наприклад, комфортність, ступінь доступності поїздки та інше. Кількісний показник якості перших двох груп властивостей можна визначити кількісно. Ступінь комфортності пасажирів протягом поїздки та вагомість підготовчо-заключних дій для її реалізації ще необхідно оцінити.

Для пішоходів, які знаходяться поза межами транспортного засобу, групи властивостей якості також ще потребують встановлення.

Пріоритетні властивості середовища, у якому функціонує міський пасажирський транспорт, до теперішнього часу не були чітко структуровані. Можна виділити групу

властивостей безпеки, включаючи інформаційну безпеку, безпеку, що пов'язана зі станом та геометрією дорожнього покриття, завантаженістю шляху, його освітленням та інші. Частково перелік властивостей якості викладений у роботі [12].

Визначення розмірності властивостей якості

Наступним етапом аналізу є встановлення кількісних показників (критеріїв) властивостей якості. При цьому необхідно враховувати низку бажаних вимог:

- показники властивостей якості повинні мати фізичний сенс та відповідну розмірність. Вони можуть бути відносними, але узгодженими з базовими розмірними показниками;

- показники повинні спиратися на оцінювальні шкали більш високого рівня.

Найбільш проста систематизація цифрових вимірюваних шкал приведена, що зустрічається у літературі, наприклад [13], має таку структуру:

- шкала найменувань;
- шкали порядку (реперні шкали);
- шкали інтервалів;
- шкали відношень;
- абсолютні шкали.

Тут шкали приведені у порядку їх довершеності.

Математичною моделлю порівняння вимірюваних величин є вираз:

$$q_1 - q_2 = \Delta q_{1-2}. \quad (1)$$

Початок відліку за шкалою інтервалів є довільним. На ній повністю визначені дії щодо додавання, віднімання, але не їх відношення. Тому можна визначити на скільки одна величина q_1 відрізняється від іншої q_2 , але неможливо визначити в скільки разів. Наочний приклад – шкала часу.

Математичною моделлю порівняння за шкалою відношення є вираз:

$$Q_1 = q[Q_2]. \quad (2)$$

Значення вимірюваної величини Q_1 визначається числовим значенням q та деяким розміром $[Q_2]$.

Шкала відношень є найбільш довершеною та інформативною. На ній визначені усі ма-

тематичні дії. Прикладом є температурна шкала Кельвіна.

Абсолютні шкали мають усі властивості шкали відношень. Одиниці абсолютних шкал є природними, а не обрані за співвідношенням. Абсолютні одиниці величин не є похідними одиницями системи SI, вони є позасистемними. Приклади – шкала ККД, коефіцієнти поглинання або віддзеркалення та інші.

Розглянемо фізичні основи критеріїв якості транспортних послуг. Відомо, що критерії якості транспортної роботи щодо переміщення вантажу (пасажирів) є величина:

$$K = QLV^2, \quad [\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2}], \quad (3)$$

де Q – маса вантажу; L – відстань переміщення вантажу; V – швидкість переміщення.

Тут QL – робота щодо переміщення, а параметр швидкості, що введений у цей вираз, є основою процесу інтенсифікації перевезень або зручності для пасажирів.

При цьому слід відзначити, що для зменшення часу у дорозі необхідно збільшити швидкість переміщення, наприклад, у 2 рази, але це тягне за собою збільшення потрібної потужності двигуна у 8 разів, та, як наслідок, збільшення витрати палива, викидів шкідливих речовин до атмосфери міста.

Аналіз критерію K демонструє ще інше протиріччя для планування МПТС. Для забезпечення високої ефективності міських пасажирських перевезень необхідно прагнути до повного завантаження салону транспортного засобу. Цього можливо досягнути двома варіантами організації маршрутів руху:

- повним завантаженням пасажирами салону у пункті початку руху та беззупинкової їх доставки до пункту призначення;

- проходження маршруту із зупинками при повній зміні пасажиропотоку.

Перший варіант суперечить властивості “надійність” та зручності для міських пасажирів, але економічно є вигідним для автосервісу. Другий варіант – навпаки.

Паливна ефективність пасажирських перевезень визначається як відношення критерію транспортної роботи K до маси матеріалів, що витрачаються (палива, мастила, гуми та інше).

Оцінити кількість шкідливих викидів для порівняння екологічної безпеки порівнюваних маршрутів або транспортного засобу зручно за допомогою наступної залежності:

$$\frac{\text{Кількість шкідливих викідів (паспортна величина)}}{\text{Кількість виконаної транспортної роботи}} = \frac{m_b}{A} = \frac{m_b}{L} \cdot \frac{1}{QV^2}, \quad (4)$$

де m_b/L – відповідає за розмірністю нормам Євро 5, Євро 6, Євро 7; $1/QV^2$ – кількості транспортної роботи.

Аналізуючи склад пріоритетних властивостей різних компонентів МПТС необхідно відзначити, що група ергономічних властивостей входить до усіх компонентів та є достатньо важною для усієї системи. Зупинимося більш докладно на складі ергономічних властивостей.

Ергономічність розглядається як системне поняття, яке охоплює надійність, безпеку, ефективність, комфортність та інші властивості, що характеризують пристосованість системи до взаємодії з людиною у цій системі. Розглянемо більш докладно властивість комфортності. Ця властивість повинна забезпечувати мінімальну втомлюваність людини при взаємодії з технікою (машиною). При цьому під терміном “людина” розуміється водій (оператор), пасажир та пішохід.

Ключовий термін цього визначення має у деякій мірі невизначений сенс. Комфортність – властивість або стан, порівняльна характеристика затишку, зручності та задоволення, яка визначається сукупністю позитивних психологічних та фізіологічних відчуттів людини. Дискомфорт – це неприємні відчуття [14].

У роботі [1] комфорт трактується як культура обслуговування пасажирів. У статті [15] комфортність представляється як фізичне середовище, у якому здійснюється транспортна послуга з точки зору зручності поїздки, оглядовості та інше. Часто комфорт сприймається як стан оточуючого середовища, при якому людина відчуває та може мати доступний, безпечний та раціональний доступ до ресурсів середовища. Узагальнюючи ці визначення з енергетичної точки зору можливо зробити висновок, що комфортність – це властивість, яка визначається витратами усіх видів психо-фізіологічної енергії. При цьому, чим більше витрати енергії, тем менше комфортність. Тобто розмірність показника комфортності повинна мати вигляд $1/\text{Джоуль}$.

Проявленням дискомфорту є втомлюва-

ність або втома.

У якості пояснень до цього тезису слід навести декілька логічних доводів. Порівняємо стан людини, яка сидить на жорсткому стільці та м'якому зручному кріслі. Зрозуміло, що при усіх рівних умовах, людина втомлюється менше у другому випадку, так як витрати його м'язової енергії менше. Другий випадок – людина знаходиться у оточуючому середовищі з м'яким, спокійним освітленням та, на протилежність цьому випадку – людина знаходиться у середовищі з різкою зміною освітлення великої амплітуди та підвищеної частоти. Вочевидь, при цьому його втома накопичується значно скоріше та витрат зорової (психічної) енергії більше. Існує багато прикладів подібних порівнянь відчуттів людини (витрат енергії) на теплові, акустичні та інші впливи середовища. Усі вони підтверджують наведений вище тезис.

Відомі психо-фізіологічні закони реакції людини на умови (сигнали) оточуючого середовища. Найбільш відомий з них психо-фізіологічний закон Вебера-Фехнера. Він описує залежність рівня зареєстрованого відчуття умови X від значень подразника \cdot :

$$X = alg\beta + b, \quad (5)$$

де a та b – константи, які залежать від оцінюваних властивостей.

У роботі [16], яка виконана шведськими та американськими дослідниками, приведено залежність параметра втоми від низки факторів оточуючого середовища:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 X_2 + \beta_{12} T X_2 + \varepsilon, \quad (6)$$

де Y – параметр втоми за Боргом або SOFI (за сенсом цей параметр є зворотною величиною ступеня втоми); β_0 – параметр переривання у роботі (короткочасний відпочинок); β_1 , β_2 , β_{12} – коефіцієнти; T – час; X_2 – параметр втомуючого фактору; ε – похибка.

Ця залежність демонструє гіперболічний зв'язок втоми з тривалістю впливу втомуючого фактору.

Більш того, асимптоти цієї гіперболічної залежності не співпадають з нульовими значеннями координат та зміщені відносно осей координат на певні значення параметрів. Це є свідомством того, що існують певні порогові значення часу та параметру втоми, які людиною не відчуються. Тобто протягом часу

зміщення асимптоти від нульового значення людина не відчуває втомі від трудової діяльності (наприклад, поїздка у транспорті).

Приведені залежності дозволяють кількісно оцінити рівень якості частини підвластивостей властивості комфортності.

Частина підвластивостей комфортності нормується міжнародними стандартами. Так у документі [17] за 7-бальною шкалою оцінено рівень теплового комфорту на висоті грудної клітини людини та на висоті його зросту. Оцінено комфортний рівень повітряних потоків.

Стандарти ISO11226 та ISO9241-5 охоплюють вимоги до фізичної пози водія (пасажирів) та ергономіки робочого місця для запобігання надмірного навантаження та зниження психо-фізіологічної втомі.

Документ UNECE R125 встановлює вимоги до оглядовості та мінімізації візуальних перешкод для водія. У деякому менш строгому вигляді ці вимоги можливо віднести до пасажирів автотранспорту.

У документах ISO2631 та ISO1999 визначено допустимі межі щодо впливу вібрацій та шуму, які попереджують підвищене психо-фізіологічне навантаження. Нажаль, у більшості згаданих документів кількісні показники якості ергономічних властивостей надані з використанням більш примітивних шкал, ніж шкала відношень або абсолютна шкала.

За частиною естетичних підвластивостей групової ергономічної властивості деякі показники якості (без їх кількісного оцінювання) приведено у роботі [12].

Аналіз приведеної інформації показав, що для складових групи властивості комфортності, параметри яких можливо визначити об'єктивними інструментальними способами, існує можливість синтезувати кількісні розмірні показники якості властивостей. Кількісна оцінка якості властивостей, які не вимірюються інструментально, вимагає додаткових досліджень.

Модель управління якістю планування МПТС

Для підвищення адекватності реальним умовам функціонування МПТС та можливості її цільової оптимізації при плануванні пропонується використовувати комплексну кількісну математичну модель. Її можливо записати у вигляді:

$$K_{\text{ком}} = \sum_{i=1}^n (K_1 g_1 t_1^{-1} + K_2 g_2 t_2^{-1} + \dots + K_n g_n t_n^{-1}) \cdot n^{-1}, \quad (7)$$

де $K_{\text{ком}}$ – комплексний кількісний показник якості системи; K_i – групові кількісні показники; g_i – коефіцієнти вагомості груп системи; t_i – тривалість підготовки до функціонування групи системи; n_i – враховувана кількість груп властивостей системи.

У цій матмоделі вихідним параметром, що оптимізується, є параметр $K_{\text{ком}}$. Вхідними параметрами є K_i та t_i . Керувальним параметром є g_i , який задається в залежності від цілі оптимізації. Значення g_i задаються у межах $0 \dots 1,0$ та $\sum g_i = 0 \dots 1,0$. Усі параметри у цій формулі виражені у відносному вигляді.

Обґрунтування цієї матмоделі для транспортних засобів та алгоритм її використання викладено у роботі [6]. У цій роботі запропоновано використовувати розглянуту вище залежність для оптимізації планування системи.

Для МПТС, за нашою думкою, пріоритетними властивостями є:

- гнучкість систем, яка розглядається як можливість швидкого перекомпонування маршрутів руху та перенаправлення пасажиропотоків;
- надійність, як впевненість доставки пасажирів до необхідних пунктів;
- ергономічність та безпека перевезення пасажирів;
- група економічних властивостей.

Для частини цих властивостей обґрунтовані кількісні показники властивостей. Для іншої частини властивостей необхідно синтезувати об'єктивні показники.

При рішенні задачі управління якістю планування системи перевезень необхідно використовувати можливості штучного інтелекту.

Досягнення обґрунтованого рішення потребує залучення величезних баз даних та відповідних матмоделей оцінки низки показників якості.

Висновки

У роботі запропоновано комплексна кількісна матмодель управління якістю планування міської пасажирської транспортної системи. Керувальними параметрами у цій моделі є коефіцієнти вагомості відповідних властивостей. Необхідність використання комплексної оцінки транспортних систем, особливо для великих міст, відзначена низкою авторів. Менш вивченим питанням є обґрунтування кількісної розмірної оцінки показників властивостей.

Приведено розмірні кількісні показники властивостей, які характерні для транспортних засобів. Більш ретельно розглянуто розмірності групи ергономічних властивостей, включаючи комфортність для водія, пасажирів та пішоходів. Описано особливості залежності параметру втрати часу, які є важливими при плануванні маршрутів міського пасажирського транспорту.

Подяка

Автори висловлюють велику подяку д-ру техн. наук, проф. Аргун Ш. В. та канд. техн. наук Войтківу С. В. за надану інформацію щодо літературних джерел та нормативних документів за темою дослідження, а також за цінні зауваження, що були зроблені при обговоренні теми та змісту роботи.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Никончук, В.М. (2022) Дослідження системи транспортного обслуговування пасажирів за показниками якості. Кропивницький : Центральнотрапнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. 5 (36), Ч. 2, 246–253. Nykonchuk V. (2022). Doslidzhennia systemy transportnoho obsluhovuvannia pasazhyriv za pokaznykamy yakosti. [Studying the system of transportation service of passengers by quality indexes]. CUNV: sb. nauch. tr. 5 (36). P. 2, 246-253. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.246-253](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.246-253). – <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12752>
2. Ільченко, В.Ю. & Петровська, С.І. (2019). Підходи до оцінювання якості міських пасажирських перевезень автомобільним транспортом. Східна Європа: економіка, бізнес та управління, 3(20), 219–226. Pichenko, V. & Petrovska, S. (2019). Pidkhody do otsiniuvannia yakosti miskykh pasazhyrskykh perevezen avtomobilnym transportom. Skhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia. [Approaches to quality estimation of city passenger transportation by automobile vehicles]. Eastern Europe: economics, business and management, 3(20), 219–226. [in Ukrainian]. https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/20_2019/35.pdf.
3. Любий, Є.В. Чижик, В.М., Ковбан, С.В. (2019). Дослідження якості обслуговування пасажирів на автобусному маршруті №240 міста Одеси. Системи управління, навігації та зв'язку, 3, 63–71. Liubiy, Ye., Chyzhyk, V., Kovban, S. (2019). Doslidzhennia yakosti obsluhovuvannia pasazhyriv na avtobusnomu marshruti №240 mista Odesy. [Studying quality of service on bus route Nb. 240 in Odessa city]. Systems of control, navigation and communication, 3, 63–71. [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2019_3_12.
4. Руденко, М. (2024). Комплексна оцінка якості надання послуг пасажиром залізничного транспорту, як стратегічний інструмент для забезпечення економічного успіху залізничних підприємств. Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences, 326, 1, 233–246. Rudenko, M. (2024). Kompleksna otsinka yakosti nadannia posluh pasazhyram zaliznychnoho transportu, yak stratehichnyi instrument dlia zabezpechennia ekonomichnoho uspikhu zaliznychnykh pidpryemstv. [Complex estimation of quality of railway passenger service, as strategy tool for ensuring economic success of railway enterprises]. Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences, 326, 1, 233–246. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-38>
5. Вдовиченко, В.О. (2017). Методологічні основи формування системної ефективності громадського пасажирського транспорту в умовах сталого розвитку (KHNADU). Vdovychenko, V. (2017). Metodolohichni osnovy formuvannia systemnoi efektyvnosti hromadskoho pasazhyrskoho transportu v umovakh staloho rozvytku. [Methodological fundamentals of forming systematic efficiency of passenger transportation at conditions of steady development]. Monograph. Kharkiv: KHNADU. [in Ukrainian].
6. Тараненко, М. Є., Мигаль, Г. В., Кобрина, Н. В., & Маковецький, А. В. (2022). Проблема комплексного забезпечення якості та безпеки функціонування транспортних засобів. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, 21, 6–21. Taranenko, M., Myhal, H., Kobrina, N. & Makovetskyi, A. (2022). Problema kompleksnoho zabezpechennia yakosti ta

- bezpeky funktsionuvannia transportnykh zasobiv. [Problem of complex provision of quality and safety of transportation vehicles functioning]. Cars and electronics. Advanced technologies 21, 6–21. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.05>
7. Попович, Д., Петриків, А., Чепесюк, Л., Шевчук, О., Фалович, Н., Маяк, М., Петринюк, Н. (2021). Вимірювання комфорту в громадському транспорті. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2(17), 117–126. Popovych, D., Petrykiv, A., Chepesiuk, L., Shevchuk, O., Falovych, N., Maiak, M., Petryniuk, N. (2021). Vumiriuvannia komfortu v hromadskomu transporti. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. [Measuring of comfort in passenger vehicles]. Advanced technologies in machine-building and transport, 2(17), 117–126. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i17.641>
 8. Тараненко, М.Є., Мигаль, Г.В., Кобринна, Н.В., Тараненко, І.М., Молоштан Д.В. (2022). Кваліметрична модель управління якістю технічної підготовки виробництва транспортної техніки. Центральнотрапезький науковий вісник. Технічні науки, 6(37), II, 99–107. Taranenko, M., Mygal, N., Kobryna, N., Taranenko, I., Moloshtan D. (2022). Kvalimetrichna model upravlinnia yakistiu tekhnichnoi pidgotovky vyrobnytstva transportnoi tekhniki. [Qualimetric model of quality control for engineering preparation of production for manufacturing of transportation vehicles]. Central Ukrainian Scientific Journal. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.99-107](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.99-107)
 9. Azgaldov, Garry G. (2015). The ABC of Qualimetry Toolkit for measuring the immeasurable / Garry G. Azgaldov, Alexander V. Kostin, Alvaro E. Padilla Omiste, Ridero. ISBN 978-5-4474-2248-6. http://www.labrate.ru/kostin/20150831_the_abc_of_qualimetry-text-CC-BY-SA.pdf
 10. Сатир, Л.М., Задорожна, Р.П., Непочатенко, А.В. & Кепко О.І. (2021). Аналітичний кваліметричний підхід до оцінки якості продукції як інструмент прийняття ефективних стратегічних рішень. Інвестиції: практика та досвід, 17, 18–24. Satyr, L., Zadorozhna, R., Nepochatenko, A. & Kepko O. Analitichnyi kvalimetrychnyi pidkhid do otsinky yakosti produktsii yak instrument pryiniattia efektyvnykh stratehichnykh rishen. [Analytical qualimetric approach for quality estimation of products as a tool for making effective strategic solutions]. Investments: practice and experience, 17, 18–24. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2021.17.18>
 11. Дмитренко, Г. А., Ануфрієва, О. Л., Бурлаєнко, Т.І, Медвідь, В. В. (2016). Кваліметрія в управлінні: гуманістичний контекст: навчальний посібник. К.: Видавництво “Аграрна освіта”. Dmytrenko, H., Anufriieva O., Burlaienko, T., Medvid, V. (2016). Kvalimetriia v upravlinni: humanistychnyi kontekst: navchalnyi posibnyk [Qualimetry in management: humanitarian context: textbook for students]. Kyiv: Agricultural education. [in Ukrainian].
 12. Босняк, М.Г. (2011). Пасажи́рські автомобільні перевезення: навч. посіб. К.: Видавничий дім “Слово”. Bosniak, M. (2011). Pasazhyrski avtomobilni perevezennia: navch. posib. [Passenger car transportations: textbook for students]. Kyiv: Publ. "Slovo". [in Ukrainian].
 13. Тараненко, М.Е. (2015). Кваліметрія в листовій штамповке: учебник. Х.: Нац. аерокосм. ун-т “ХАИ”. Taranenko, M. (2015). Kvalimetriya v listovoy shtampovke: uchebnik. [Qualimetry in sheet stamping]. Kharkiv: KhAI. [in Russian]. ISBN 978-966-652-380-8
 14. Ергономіка теплового середовища. (2011). Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2005, IDT); ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Дискомфорт> (дата звернення: 09.11.2024). Ergonomika teplovoho seredovyscha. [Ergonomics of the thermal environment]. Analitichne vyznachennia ta interpretatsiia teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD kryteriiv lokalnoho teplovoho komfortu (2011). DSTU B EN ISO 7730:2011. Retrieved from <https://uk.wikipedia.org/wiki/Дискомфорт> (accessed on November 9, 2024). [in Ukrainian].
 15. Аулін, В.В., Голуб, Д.В. (2008). Якість перевезень пасажирів як невід’ємна частина транспортного процесу. Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського, 5/2008(52), 2, 80–84. Aulin V., Holub D. (2008). Yakist perevezen pasazhyriv yak nevidiemna chastyna transportnoho protsesu. [Quality of transportation as unmountable part of transportation process]. Journal of KSPU, 5/2008(52), 2, 80–84. <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstream/s/3c52583c-52a8-45e4-8bd4-1e52bfc3fa1a/content> [in Ukrainian].
 16. Theory of Human Fatigue [Electronic resource]. (n.d.). Retrieved November 9, 2024, from <https://faculty.mnsu.edu/shaheenahmed/theory-of-fatigue>.
 17. Ергономіка теплового середовища. (2011). Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2005, IDT); ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ergonomika teplovoho seredovyscha. [Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination

and interpretation of thermal comfort based on PMV and PPD indices of local thermal comfort]. (2011). DSTU В EN ISO 7730:2011. [In Ukrainian].

Тараненко Михайло Євгенович¹, д.т.н., проф., проф. каф. кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури, тел. +38 096-287-43-08, m.taranenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3819-6948

Мигаль Галина Валеріївна², д.т.н., проф., проф. каф. транспортних технологій, тел. +38 050-636-87-17, halyna.v.myhal@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-9862-9338

Кобріна Наталія Віталіївна¹, к.т.н., доцент, зав. кафедрою автомобілів та транспортної інфраструктури, тел.: +38 057-788-41-07, n.kobrina@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9499-2079

Тараненко Ігор Михайлович¹, к.т.н., доцент, професор кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, тел.: +38 097-448-34-25, igor.taranenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9554-0162

¹Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", 61070, Україна, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

²Національний університет «Львівська політехніка», 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12.

Management of quality for planning of city passenger transportation systems

Abstract. Problem. The article addresses the critical issue of enhancing the quality of urban passenger transport systems (UPTS) at the planning stage. Achieving this goal requires the creation of a comprehensive quantitative mathematical model capable of optimizing the system's quality based on predefined objectives. This optimization involves the development of quantitative indicators for the entire system and its components, which serve as a foundation for decision-making. **Goal.** The study aims to improve UPTS functioning by focusing on key priority attributes, such as flexibility, ensuring the ability to swiftly reorganize traffic routes and redistribute passenger flows; reliability, providing confidence in delivering passengers with minimal deviations from schedules; ergonomics and safety, emphasizing passenger comfort and protection; and economic properties, addressing cost-efficiency and operational sustainability. **Methodology.** The research utilizes theoretical-analytical methods to

create a structured framework for planning UPTS. Mathematical modeling forms the core of the methodology, enabling detailed evaluation and optimization of critical system attributes. **Results.** The study provides insights into the optimization of UPTS functioning, demonstrating improved performance through targeted planning and adjustment of quantitative quality indicators. The integration of mathematical modeling into planning allows identifying inefficiencies and addressing them systematically. **Originality.** The novelty of the research lies in its integrated and systematic approach to defining and quantifying quality indicators for UPTS. Unlike traditional evaluations that often emphasize comfort, this study introduces a comprehensive model encompassing various attributes, including flexibility, reliability, and economic feasibility. **Practical value.** The proposed model allows practitioners to use empirical data and technical specifications of system components to calculate key performance indicators. This approach supports more informed decision-making and targeted improvements in urban transport planning.

Key words: urban transport system, quality indicators, mathematical modeling, flexibility, reliability, ergonomics, economic efficiency.

Taranenko Mykhaylo¹, professor, Doct. of Science, Department of Automobiles and Transport Infrastructure, tel. +38 096-287-43-08, m.taranenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3819-6948

Mygal Galyna², professor, Doct. of Science, Department of Transportation Technologies, tel. +38 050-636-87-17, halyna.v.myhal@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-9862-9338

Kobryna Nataliia¹, Ass. Prof., Ph.D., Head of Dept. of Automobiles and Transport Infrastructure, +38 057-788-41-07, n.kobrina@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9499-2079

Taranenko Igor¹, Ass. Prof., Ph.D., professor of Department of Composite Structures and Aviation Materials, tel.: +38 097-448-34-25, igor.taranenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9554-0162

¹National Aerospace University "KhAI", 17, Vadym Manko str., Kharkiv, 61070, Ukraine.

²National University "Lviv Polytechnic", 12, S. Bandera st., Lviv, 79013, Ukraine.

Імітаційне моделювання зарядного контролера LTC4020 для літій-іонних акумуляторів

Багач Р.В.¹, Гнатів А.В.¹, Аргун Щ.В.¹,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті проаналізовано літій-іонні акумулятори, їхні характеристики та проблеми заряджання. Розглянуто використання комбінованого контролера LTC4020, який інтегрує функції підвищувального та знижувального перетворювача напруги, забезпечуючи точне регулювання струму й напруги. Виконано моделювання роботи контролера як підвищувального перетворювача, що підтверджує важливість оптимального налаштування параметрів для безпечного заряджання батарей. Отримані результати можуть бути застосовані для підвищення ефективності заряджання в електротранспорті, фотоелектричних системах та портативних пристроях.

Ключові слова: літій-іонні акумулятори, зарядний пристрій, контролер LTC4020, моделювання, енергоефективність, безпека заряджання.

Вступ

Літій-іонні акумулятори стали широко використовуваними в різних сферах, таких як електромобілі, гібридні автомобілі, мобільні пристрої та фотоелектричні системи. Їх обирають завдяки високій щільності енергії, низькому рівню саморозряду та мінімальним вимогам до обслуговування. Однак літій-іонні акумулятори мають суворі експлуатаційні обмеження, вимагають складних схем захисту, є дорогими та схильні до деградації через старіння, навіть без активного використання. Для досягнення їхньої максимальної ефективності необхідні подальші дослідження в цій галузі [1-3].

Стає звичним, що все більше пристроїв, які працюють на акумуляторах, можуть заряджатися від різноманітних джерел і використовувати батареї різних хімічних типів з широким діапазоном струмів і напруг. Прикладом можуть бути автомобільні зарядні пристрої, які потребують все вищих напруг і струмів через використання нових схем збирання масивів великих акумуляторів [4,5].

Майже всі типи акумуляторних батарей чутливі до перезаряджання, тому потребують дотримання чітких правил під час експлуата-

ції. Існуючі рішення на базі єдиної інтегральної схеми (IC) охоплюють лише частину можливих комбінацій вхідної напруги і струму заряду. Для вирішення інших завдань, які потребують складніших комбінацій і топологій, доводиться використовувати не оптимальні комбінації мікросхем та велику кількість дискретних елементів. Так було до того, як у 2011 році корпорація Linear Technology спростила цей сегмент ринку, створивши двомікросхемне рішення для зарядних пристроїв, включивши до нього мікросхему контролера заряджання акумулятора LTC4000 та сумісний DC/DC-перетворювач із зовнішньою компенсацією.

Аналіз публікацій

Технології літій-іонних акумуляторів (Li-ion). Літій-іонні акумулятори є одними з найпопулярніших джерел живлення для різних мобільних пристроїв та електромобілів через їх високу енергетичну щільність, низьку вагу та ефективність. Однак існують певні проблеми з їх зарядкою та експлуатацією, зокрема щодо уникнення надмірної зарядки чи розрядки, які можуть призвести до скорочення терміну служби батареї або навіть до

вибуху [6,7].

Контролери заряду та їх функції. Контролери заряду відіграють критичну роль у забезпеченні безпечної та ефективної зарядки Li-ion батарей. Вони здійснюють контроль струму та напруги під час процесу зарядки, використовуючи різні алгоритми для різних типів акумуляторів. Одним із найбільш універсальних рішень є контролери з функцією знижувального/підвищувального перетворення напруги, що дозволяє ефективно заряджати батареї з широким діапазоном вхідних параметрів.

Особливості LTC4020. У статтях, що розглядають контролери заряду, моделі на LTC4020 виділяються завдяки своїм характеристикам. LTC4020 є комбінованим контролером зарядки з підтримкою підвищувально/знижувального перетворювача напруги. Він дозволяє заряджати батареї різних типів та є сумісним з широким діапазоном вхідної напруги (4,5 В до 55 В). Особливою перевагою LTC4020 є точність регулювання струму та напруги, що дозволяє уникнути перезарядки та глибокого розряду, які негативно впливають на стан акумуляторів.

Алгоритми зарядки та оптимізація енергоефективності. Контролер LTC4020 використовує різні алгоритми заряджання, такі як CC/CV (постійний струм/постійна напруга) та алгоритм C/10 який має струм заряджання 100 мА, що оптимізує процес зарядки для різних хімічних складів акумуляторів (Li-ion, LiFePO₄, суперконденсатори тощо). Це дозволяє мінімізувати втрати енергії та забезпечити ефективність зарядки на рівні понад 90%, а інколи до 97%, залежно від умов експлуатації.

Моделювання роботи контролера. Імітаційне моделювання, яке було проведено для дослідження роботи LTC4020, показало важливість вибору правильних параметрів для заряджання Li-ion батарей. Було встановлено, що розряд до 2,8 В і нижче призводить до швидкої деградації батареї, а перевищення напруги понад 4,2 В може спричинити витік електроліту та підвищений ризик вибуху. Моделювання дозволяє оптимізувати параметри зарядного процесу та підвищити безпеку використання акумуляторів.

Таким чином сучасні контролери, такі як LTC4020, забезпечують надійне та безпечне управління зарядом літій-іонних акумуляторів. Їх гнучкість у підтримці різних типів акумуляторів, ефективне регулювання струму та напруги, а також можливість роботи у

широкому діапазоні вхідних напруг роблять їх важливими компонентами для сучасних зарядних пристроїв.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є проведення аналізу і моделювання роботи контролера LTC4020 для заряджання літій-іонних акумуляторів, що дозволить оптимізувати параметри заряджання, забезпечити безпеку експлуатації та підвищити енергоефективність зарядних пристроїв.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- провести огляд та аналіз технологій літій-іонних акумуляторів, приділивши особливу увагу проблемам заряджання і розряджання, які спричиняють деградацію або пошкодження батарей;

- дослідити функціональні можливості контролера заряду LTC4020, включаючи точність регулювання струму та напруги, сумісність із різними джерелами живлення і підтримку трьох алгоритмів закінчення заряду;

- виконати імітаційне моделювання роботи контролера LTC4020 в конфігурації підвищувального перетворювача та оцінити його ефективність під час заряджання літій-іонних акумуляторів;

- визначити оптимальні параметри заряджання, які мінімізують ризики перезарядки та глибокого розряду, що дозволить уникнути деградації батарей і підвищити безпеку їх експлуатації;

- оцінити можливості використання LTC4020 для заряджання інших типів батарей і суперконденсаторів, враховуючи його універсальність і високу ефективність.

Літій-іонні акумулятори (Li-ion)

Li-ion акумулятори є одним із найпоширеніших типів сучасних джерел живлення завдяки їх високій енергетичній щільності, довговічності та універсальності. Вони широко використовуються у портативних пристроях, електромобілях, системах зберігання енергії та інших високотехнологічних галузях [8, 9].

Однією з ключових переваг Li-ion акумуляторів є їх висока енергетична щільність, що забезпечує тривалий час автономної роботи у порівняно компактних розмірах і вазі [10, 11]. Це робить їх незамінними у таких пристроях, як смартфони, ноутбуки, дрони, а також електромобілі. Ще однією важливою характеристикою є низький рівень саморозряду, що дозволяє зберігати заряд батареї

протягом тривалого часу без використання, рис. 1.



Рис. 1. Переваги і недоліки літій-іонних акумуляторів

Відсутність ефекту пам'яті, властивого іншим типам акумуляторів, зокрема нікель-кадмієвим, є ще однією суттєвою перевагою. Li-іон акумулятори не потребують повного розрядження перед зарядкою, що полегшує їх використання в повсякденному житті. Крім того, такі батареї працюють у широкому температурному діапазоні, забезпечуючи стабільну роботу навіть у складних умовах.

Енергоефективність літій-іонних батарей перевищує 90%, що дозволяє зменшити втрати енергії під час заряджання та розряджання. Відносна екологічність цих акумуляторів порівняно зі свинцево-кислотними чи нікель-кадмієвими також додає їм конкурентоспроможності, адже вони не містять токсичних важких металів.

Попри численні переваги, Li-іон акумулятори мають певні обмеження, які впливають на їх експлуатацію, рис. 1. Насамперед, вони є чутливими до умов заряджання та розряджання. Неправильна експлуатація, наприклад, перезарядка або глибока розрядка, може спричинити деградацію або навіть вихід батареї з ладу. Це вимагає застосування складних систем захисту, таких як контролери заряду.

Ще одним суттєвим обмеженням є природна деградація акумуляторів. Навіть за умов дотримання рекомендацій щодо експлуатації, літій-іонні батареї з часом втрачають ємність

через хімічні процеси всередині. Типовий термін служби таких батарей становить 2-3 роки активного використання.

Додатково слід врахувати їх чутливість до екстремальних температур. Низькі температури зменшують ефективність роботи, а високі прискорюють деградацію. Також у разі пошкодження батареї або порушення умов експлуатації можливе перегрівання, що може призвести до займання чи вибуху. Це підвищує вимоги до їхньої безпеки.

Останнім аспектом є висока вартість виробництва, зумовлена складною технологією виготовлення та використанням дорогих матеріалів, таких як літій і кобальт.

Такий широкий спектр переваг та певні обмеження літій-іонних акумуляторів вимагає використання надійних та ефективних рішень для їх заряджання, одним із яких є комбіновані зарядні пристрої, що забезпечують оптимальні умови для роботи батареї.

Аналіз комбінованого зарядного пристрою

На початкових етапах створення зарядного пристрою розробники стикаються з низкою проблем. Це стосується вибору серед широкого спектра акумуляторів, роботи з батареями високої ємності та необхідності врахування вхідної напруги, яка може бути як вищою, так і нижчою за напругу акумулятора. Для цього потрібні складні комбіновані схеми. Додатково, ситуацію ускладнює відсутність простих і універсальних рішень на базі однієї мікросхеми для заряджання акумуляторів [12].

До основних проблем при створенні зарядного пристрою належать:

- різноманітність вхідних напруг для заряджання: деякі перевищують напругу акумулятора, а інші – нижчі;
- діапазон вхідної напруги, який може бути як вищим, так і нижчим за напругу акумулятора;
- високі вхідні напруги (понад 30 В).

Джерела вхідного живлення також дуже різноманітні: від мережевих адаптерів потужністю 5-19 В і більше, до систем із випрямленням на 24 В змінного струму, сонячних батарей із високим внутрішнім опором, а також автомобільних та вантажних акумуляторів. Це вимагає використання акумуляторів різних типів, таких як літій-іонні (Li-Ion, Li-Polymer, LiFePO₄), свинцево-кислотні чи нікелеві, що ще більше ускладнює процес розробки.

Через такі виклики мікросхеми для зарядних пристроїв часто обмежуються знижувальними контролерами або більш складними топологіями, наприклад SEPIC. Якщо ж до цього додати необхідність заряджання від сонячних батарей, завдання стає ще складнішим. Жоден із наявних зарядних пристроїв на базі однієї мікросхеми поки не вирішує всі ці питання комплексно.

Одним із рішень цих проблем є використання компактних інтегрованих пристроїв. Зокрема, комбінований контролер заряджання LTC4020 дозволяє реалізувати знижувально/підвищувальну топологію на базі однієї мікросхеми, що значно спрощує розробку зарядних пристроїв [13].

Контролер заряджання акумулятора LTC4020

LTC4020 – це сучасний пристрій для керування високою напругою живлення та зарядом різних типів хімічних акумуляторів. Він розроблений для ефективної передачі потужності від різноманітних джерел у шину живлення системи та для заряджання акумулятора.

Пристрій забезпечує точне регулювання

струму та напруги заряду в межах $\pm 0,5\%$ та працює у широкому діапазоні вхідної напруги від 4,5 В до 55 В. Він сумісний із багатьма джерелами живлення, маючи вихідну напругу до 55 В, струм заряду до 20 А та можливість вибору трьох алгоритмів закінчення заряду. Це дозволяє використовувати LTC4020 для різних типів акумуляторів та хімічних батарей. Вбудований підвищувальний/знижувальний DC/DC-контролер дає можливість працювати з акумуляторами, напруга може бути як вищою, так і нижчою за вхідну (VIN).

Основні застосування LTC4020 включають портативне промислове та медичне обладнання, системи з сонячними батареями, військову техніку та вбудовані автомобільні системи з робочою напругою від 12 В до 24 В. Однією з ключових особливостей LTC4020 є інтелектуальна схема PowerPath (рис. 2), яка звужує діапазон напруг, необхідний для наступних компонентів системи. Ця схема також забезпечує систему потужністю навіть за повністю розрядженого акумулятора [14,15].

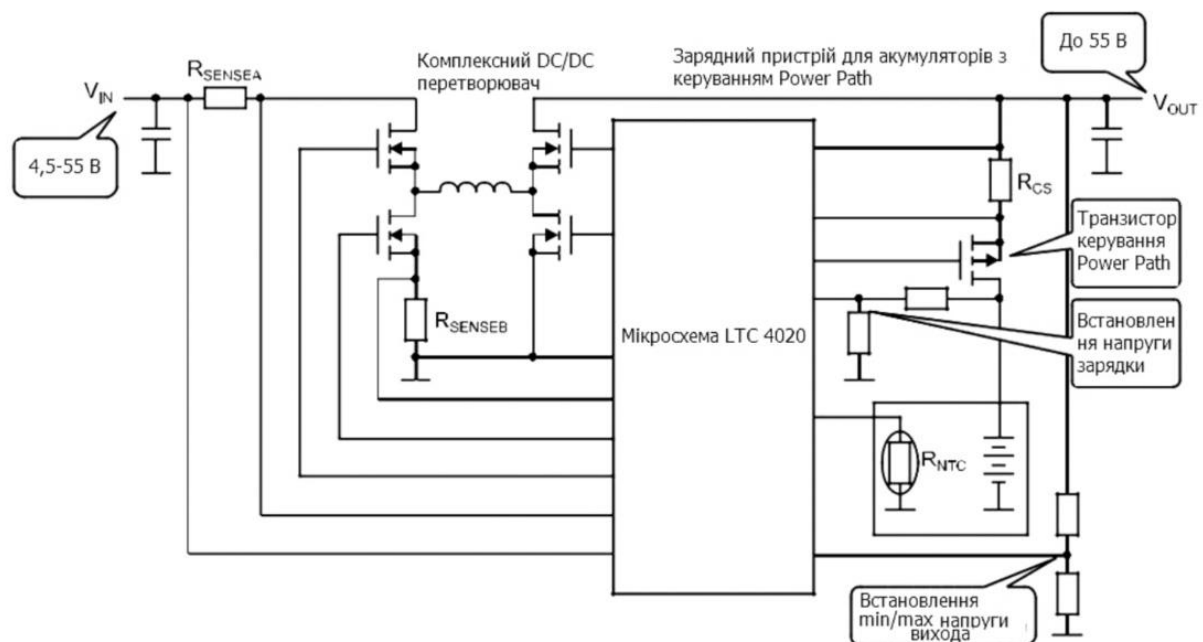


Рис. 2. Типова схема застосування контролера LTC4020

Контур регулювання вхідної напруги у функції контролю точки оптимальної потужності (MPPC) керує струмом заряду для утримання вхідної напруги на оптимальному рівні. Це корисно для джерел із високим імпедансом, таких як сонячні батареї. За відсутності вхідного живлення струм розряду

акумулятора знижується до 10 мкА, що підтримує максимальну збережену ємність.

LTC4020 підтримує три методи заряджання, оптимізовані для різних типів акумуляторів. Заряд може відбуватися за принципом постійного струму/постійної напруги (CC/CV), алгоритмом C/10 або за допомогою

таймера для літєвих акумуляторів, включаючи Li-Ion, Li-Polymer та LiFePO₄. Крім того, функція заряджання постійним струмом із таймером може бути застосована для ультраконденсаторів та нікелевих акумуляторів [16,17].

Ефективність пристрою може досягати понад 90 %, а в деяких випадках – до 97 %, залежно від вхідної напруги та рівня потужності (рис. 3).

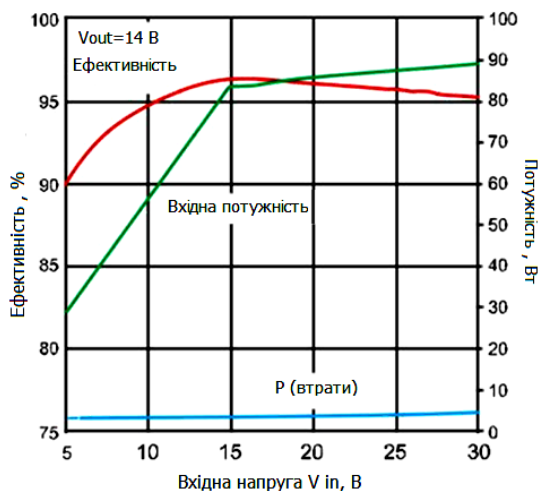


Рис. 3. Характеристика ефективності заряджання при максимальній вихідній потужності залежно від вхідної напруги

Імітаційне моделювання літій-іонного акумулятора з контролером LTC4020

Для дослідження роботи контролера заряду LTC4020 з топологією підвищувального перетворювача було виконано імітаційне моделювання за допомогою програмного забезпечення LTSpice. Основною метою моделювання є оцінка ефективності контролера та визначення оптимальних параметрів для заряджання літій-іонного акумулятора.

Для моделювання літій-іонного акумулятора в середовищі LTSpice була використана модель, яка відображає залежність стану заряду (SoC) від вихідної напруги батареї. Структура моделі складається з двох основних підсхем, що представляють позитивний і негативний електроди акумулятора.

У літературі [18,19] наведено різні моделі літій-іонних акумуляторів, такі як модель Rint, модель RC, модель Thevenin, модель PNGV та модель DP. У даному дослідженні застосовано модель Thevenin, оскільки вона забезпечує оптимальний баланс між простою реалізації, властивою моделі Rint, і ви-

сокою точністю, характерною для моделі DP. Цей підхід дозволяє ефективно моделювати поведінку літій-іонного акумулятора у процесі заряджання та розряджання.

На рис. 4 представлено схему моделі Thevenin, яка була реалізована для симуляцій у LTSpice. Такий підхід дозволяє врахувати ключові параметри акумулятора, необхідні для коректної оцінки ефективності контролера LTC4020.

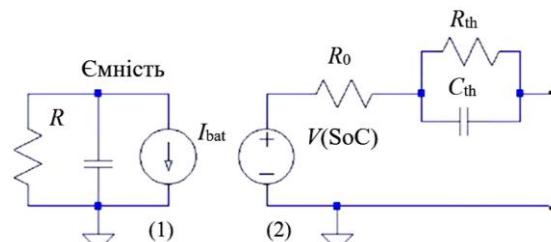


Рис. 4. Еквівалентна схема літій-іонного акумулятора (модель Thevenin)

Моделювання літій-іонного акумулятора складається з двох основних підсхем, позначених як (1) та (2). Підсхема (1), розташована ліворуч, включає три ключові компоненти: конденсатор, паралельний резистор і джерело струму. Конденсатор виконує роль моделювання ємності акумулятора у [А·год]. Напруга, що відповідає стану заряду (SoC), змінюється в діапазоні від 0 В до 1 В і визначається різницею потенціалів на його клеммах. Таким чином, ємність акумулятора у моделі може бути виражена у фарадах [Ф], що еквівалентно [А·с/В], якщо врахувати, що максимальна напруга дорівнює 1 В. Резистор, у свою чергу, використовується для імітації струмів розряду, але для коректної симуляції слід задати його велике значення. Струм I_{bat} у цій частині моделі представляє зарядний струм акумулятора.

У підсхемі (2), яка зображена праворуч, знаходиться джерело напруги, залежне від стану заряду (SoC). Напруга цього джерела змінюється відповідно до кривих заряджання батареї, наданих виробником.

Детальний метод розрахунку параметрів резисторів R_0 , R_{th} та ємності C_{th} , необхідних для побудови цієї моделі, описано у роботі [18].

Результати моделювання літій-іонної батареї за допомогою LTSpice

На рис. 5 представлені результати симуляції роботи літій-іонного акумулятора при різних значеннях зарядного струму.

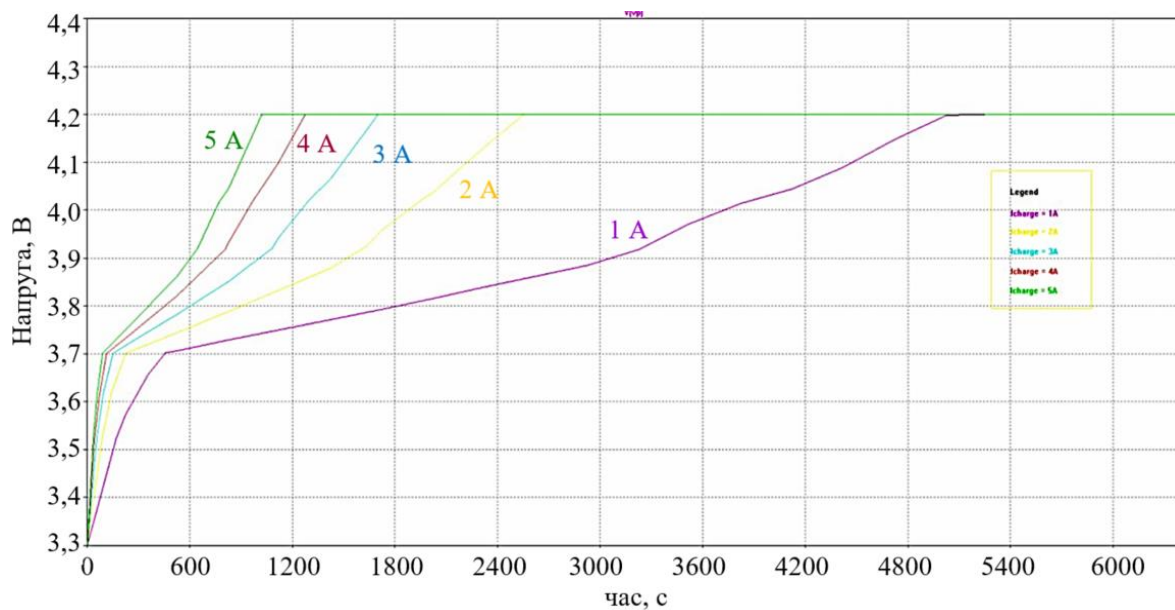


Рис. 5. Криві процесу зарядки літій-іонного акумулятора для різних значень струму

Встановлено, що напруга акумулятора змінюється в межах від 2,8 В до 4,2 В. Розряд до напруги нижче 2,8 В можливий, однак це може спричинити деградацію батареї. Повний розряд до 0 В вважається небезпечним, оскільки хімічна структура акумулятора в такому випадку стає нестабільною, що унеможливує його подальше використання.

Перевищення напруги понад 4,2 В також є небезпечним, оскільки це може призвести до витікання електроліту або навіть до вибуху акумулятора.

Таким чином, результати моделювання підкреслюють важливість дотримання рекомендованих меж напруги під час експлуатації літій-іонних батарей.

Результати моделювання LTC4020 з літій-іонним елементом

Режим роботи зарядного пристрою заснований на алгоритмі постійного струму-постійної напруги (CC-CV). На першому етапі заряджання акумулятора подається постійний струм для швидкого досягнення максимальної напруги (плаваючої напруги). Після досягнення цього значення струм поступово зменшується в геометричній прогресії, поки не знизиться до значення, яке вдесятеро менше початкового. Це дозволяє підтримувати стабільну напругу на батареї.

Зарядний пристрій може бути налаштова-

ний як понижуючий перетворювач, що знижує вхідну напругу для відповідності напрузі акумулятора. У процесі моделювання використовувався літій-іонний елемент із максимальною напругою 4,2 В. Робота понижуючого перетворювача забезпечується перемикачем та індуктивною котушкою, якими керує контролер LTC4020.

Частота перемикачання встановлена на рівні 250 кГц, а робочий цикл налаштовано на 25%, що дозволяє адаптувати вихідну напругу батареї до вхідної напруги, яка становила близько 14 В.

На рис. 6 наведено графіки струму та напруги, які подаються на акумулятор зарядним пристроєм. На них чітко видно характеристики процесу заряджання за алгоритмом CC-CV. У початковій фазі струм залишається постійним, поки акумулятор не досягне плаваючої напруги (максимальної). Після цього струм поступово зменшується до значення, яке в десять разів менше початкового, щоб підтримувати стабільну напругу.

У кінці циклу заряджання піковий струм, що спостерігається, генерується завдяки конденсатору, який є частиною моделі акумулятора. Для керування струмом використовується ключовий компонент – MOSFET. Напруга батареї, яка позначена червоним кольором, поступово підвищується до рівня 4,2 В, що чітко відображено на рис. 6.

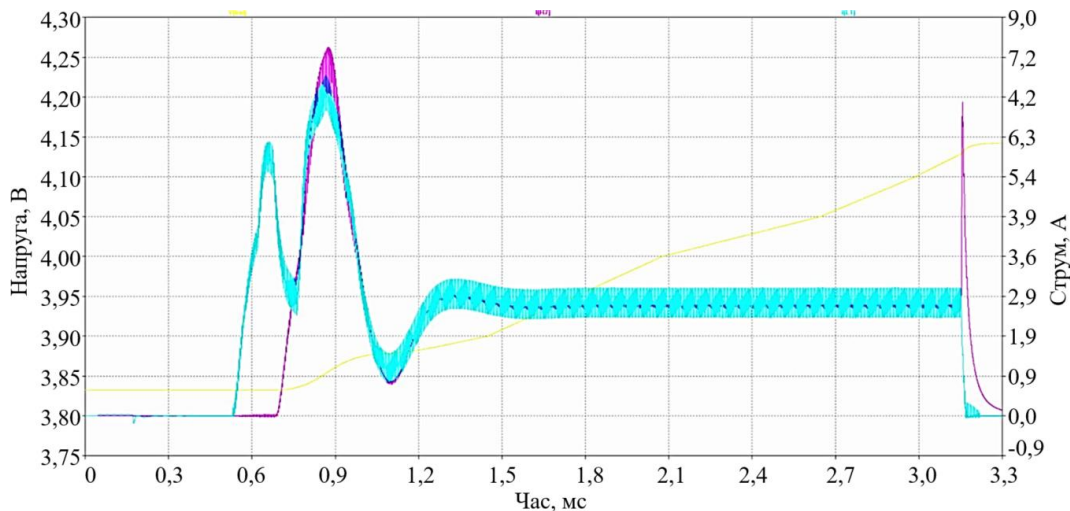


Рис. 6. Струм заряду та напруга, що подається на батарею за допомогою LTC4020

Результати вимірювань та моделювання зарядного пристрою з літій-іонним акумулятором

Для проведення вимірювань було використано джерело постійного струму, підключене до електромережі, з налаштованою силою струму на рівні 1 А. На рис. 7 представлено зміну напруги батареї в процесі заряджання. Графік демонструє чотири ключові стадії.

На першій стадії напруга повільно зростає до 2,9 В при мінімальному струмі, що відпо-

відає режиму попереднього заряджання. Після досягнення цього значення встановлюється постійний струм у 1 А, і напруга збільшується до 3,6 В, де швидкість її зростання значно сповільнюється. Цей етап характеризується режимом постійного струму. Потім напруга поступово підвищується до 3,8 В, а далі експоненційно зростає до максимальної величини 4,2 В, після чого підтримується постійною. Ця остання стадія відповідає режиму постійної напруги.

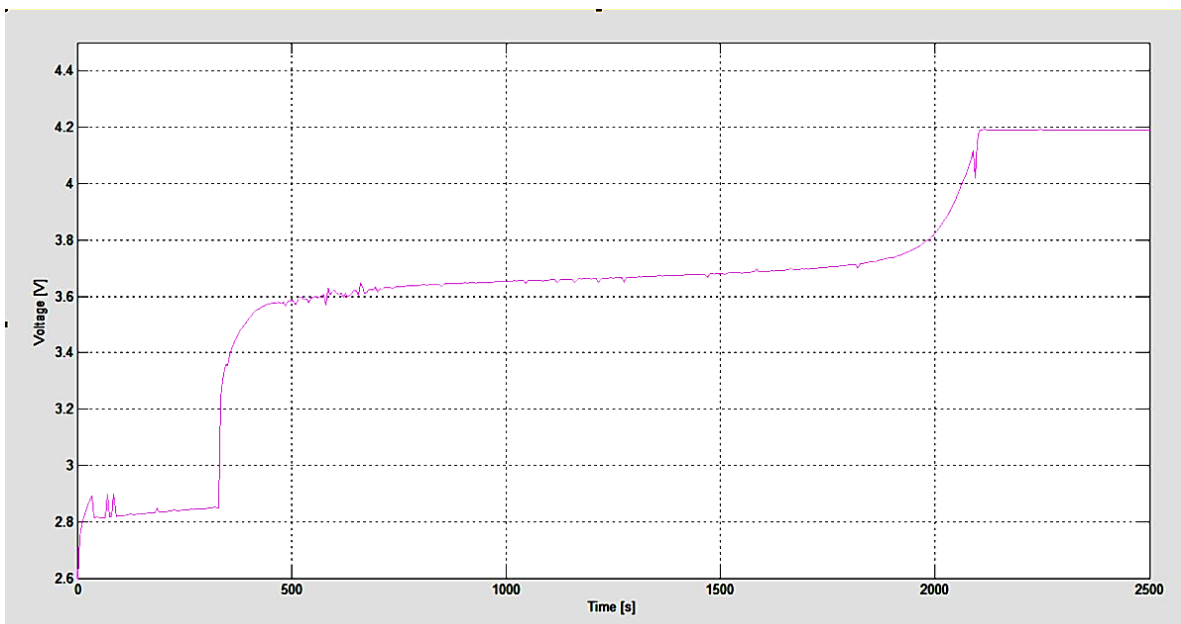


Рис. 7. Напруга літій-іонного акумулятора під час процесу заряду

На рис. 8 показано зміну зарядного струму під час цього процесу. На початку заряджання струм залишається низьким, оскільки батарея перебуває в режимі попереднього заряду. Коли напруга досягає 2,9 В, зарядний

струм встановлюється на рівні 1 А і підтримується до досягнення максимальної напруги 4,2 В. Після цього струм поступово зменшується до значення 0,1 А, що вдесятеро менше початкового.

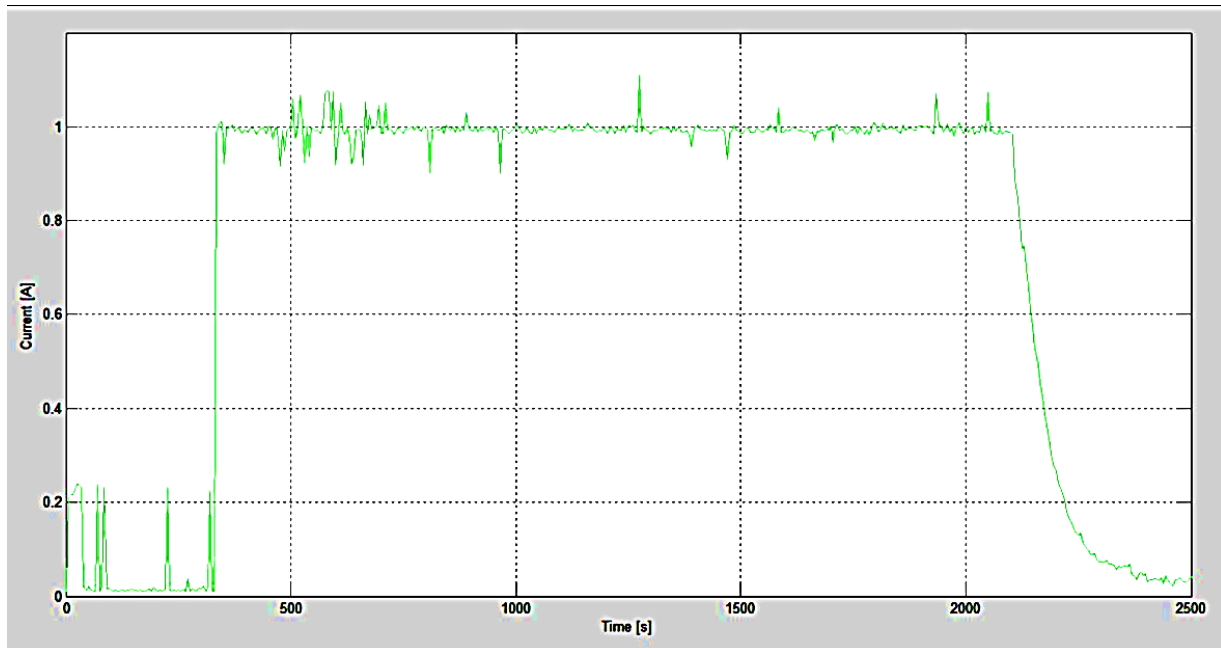


Рис. 8. Зарядний струм, що подається зарядним пристроєм

Результати моделювання для різних зарядних струмів показують зменшення часу заряджання за рахунок оптимізації параметрів. Дані про співвідношення VOC (відкритої напруги) і SoC (стану заряду) відповідають характеристикам, наведеним у літературі [19]. Інші параметри моделі, використані для симуляцій, узгоджуються з даними [18].

На рис. 6 відображено результати моделювання зарядного пристрою. Контролер LTC4020 використовує широтно-імпульсний перетворювач із двома перемикачами, чотири ключовими компонентами MOSFET і котушкою, які дозволяють адаптувати вхідну напругу для заряджання батареї. Сигнал, який керує верхнім затвором одного з MOSFET-компонентів, адаптує напругу джерела до батареї. Період перемикання становить 4 мкс, що відповідає частоті 250 кГц, як вказано у специфікації компонентів.

Рис. 7 демонструє зміну напруги та струму акумулятора під час заряджання. Спочатку струм залишається постійним, доки батарея не досягає максимальної напруги, після чого струм поступово зменшується для підтримання стабільної напруги. Використана модель акумулятора включає масштабовану ємність (1,4 мА/год), що дозволило провести моделювання у відповідних часових рамках. Поведінка моделі повністю узгоджується з теоретичними характеристиками, описаними в літературі [21].

Таким чином, результати підтверджують точність роботи контролера LTC4020 за алгоритмом CC-CV, а також демонструють його

здатність забезпечувати стабільне заряджання акумулятора з дотриманням заданих параметрів.

Висновки

У статті проведено детальний аналіз роботи контролера LTC4020 для заряджання літій-іонних акумуляторів із застосуванням топологій підвищувального та знижувального перетворювача напруги. Використання даного контролера забезпечує високу точність регулювання струму та напруги, що мінімізує ризики перезаряджання та глибокого розряду акумуляторів.

Виконане імітаційне моделювання підтвердило ефективність алгоритму заряджання CC-CV (постійний струм – постійна напруга) та його здатність оптимізувати параметри зарядного процесу. Встановлено, що контролер LTC4020 може ефективно працювати з широким діапазоном вхідних напруг (4,5 В–55 В), що робить його універсальним рішенням для різних типів батарей.

Результати моделювання показали, що перевищення рекомендованих меж напруги (2,8–4,2 В) може спричинити деградацію батареї або навіть її пошкодження. Це підтверджує важливість точного налаштування параметрів зарядного пристрою для забезпечення довговічності акумуляторів.

Модель літій-іонного акумулятора, розроблена на основі моделі Thevenin, забезпечує адекватну точність при оптимальному рівні складності, що дозволяє ефективно дослі-

джувати поведінку батарей під час заряджання та розряджання.

Контролер LTC4020 демонструє високий рівень енергоефективності, досягаючи 90–97%, залежно від умов експлуатації. Його універсальність дозволяє застосовувати даний контролер у фотоелектричних системах, електротранспорті, медичному обладнанні та інших галузях.

Отримані результати можуть бути використані для розробки сучасних зарядних пристроїв, що відповідають вимогам безпеки, ефективності та надійності, сприяючи подальшому впровадженню енергоефективних технологій у різних сферах.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Гнатів, А. В., Аргун, Ш. В., & Улянець, О. А. (2017). Електромобілі—майбутнє, яке вже настало. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, (11), 24-28. Hnatov, A. V., Arhun, Sh. V., & Ulyanets, O. A. (2017). Elektromobili—maibutnie, yake vzhe nastalo. [Electric cars are the future that has already arrived.] Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii, (11), 24-28. http://nbuv.gov.ua/UJRN/veit_2017_11_6 [in Ukrainian].
2. Гнатів, А. В., Аргун, Ш. В., & Улянець, О. А. (2016). Енергозберігаючі технології на транспорті. Наукові нотатки, (55), 80-86. Hnatov, A. V., Arhun, Sh. V., & Ulyanets, O. A. (2016). Enerhozberihaiuchi tekhnologii na transporti. [Energy-saving technologies in transport.] Naukovi notatky, (55), 80-86. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_17 [in Ukrainian].
3. Багач, Р.В., & Кальченко, О.О. (2023). Перспективи та розвиток літєвих акумуляторів в Україні. Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 25–27 жовт. 2023 р. (с. 31–34). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. Bahach, R. V., & Kalchenko, O. O. (2023). Perspektyvy ta rozvytok litiievyykh akumuliatoriv v Ukraini. [Prospects and development of lithium batteries in Ukraine.] Svitovi tendentsii resursozberzhennia na elektrychnomu transporti: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf., Kharkiv, 25–27 zhovt. 2023 r. (pp. 31–34). Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova [in Ukrainian].
4. Багач, Р.В. (2023). Використання зарядних станцій для електромобілів у Харківській області. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування SEUTTOO-2023: 14-а Міжнародна науково-практична конференція (с. 323–327). Херсон: Херсонська державна морська академія. Bahach, R. V. (2023). Vykorystannia zaryadnykh stantsii dlia elektromobiliv u Kharkivskii oblasti. [Use of charging stations for electric vehicles in Kharkiv region.] Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnologii ta obladdnannia dlia yikh obsluhovuvannia SEUTTOO-2023: 14-a Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (pp. 323–327). Kherson: Khersonska derzhavna morskak akademiiia [in Ukrainian].
5. Багач, Р. В. (2024). Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму (Докторська дисертація, Харківський національний автомобільно-дорожній університет). Bahach, R. V. (2024). Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii avtomobilnoho elektrotransportu z vykorystanniam zaryadnykh stantsii postijnoho strumu. [Improving the efficiency of electric vehicle operation using DC charging stations.] (Doctoral dissertation, Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhniy universytet). <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/20343> [in Ukrainian].
6. Багач, Р.В. (2021). Перспективи подальшого вдосконалення акумуляторних батарей для електромобілів. Міжнародна науково-практична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету "Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців" (pp. 346-349). Харків: ХНАДУ. Bahach, R. V. (2021). Perspektyvy podalshoho vdoskonalennia akumuliatornykh batarei dlia elektromobiliv. [Prospects for further improvement of batteries for electric vehicles.] Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, prysviachena 90-richchiu Kharkivskoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu ta 90-richchiu avtomobilnoho fakultetu "Novitni tekhnologii v avtomobiliebuduvanni, transporti ta pry pidhotovtsi fakhivtsiv" (pp. 346–349). Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
7. Багач, Р.В. (2024) Перспективні технології твердотільних акумуляторів. Збірник тез та доповідей міжнародної конференції "Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії". 11–12 березня 2024 року – Харків: ФОП Бровін О.В., 2024. – 424 с. Bahach, R. V. (2024). Perspektyvni tekhnologii tverdotalnykh akumuliatoriv. [Promising technologies of solid-state batteries.] Zbirnyk tez ta dopovidei mizhnarodnoi konferentsii "Enerhetychni ustanovky ta alternatyvni dzherela enerhii". 11–12 bereznia 2024 roku – Kharkiv: FOP Brovin O.

- V., 2024. ISBN 978-617-8238-51-3 [in Ukrainian].
8. Латвинський, В.Д., & Багач, Р.В. (2024). Дослідження літій-іонних батарей для експлуатації електромобілями при різних температурних умовах. ISSN 2074-2630 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №1(30)'2024. *Latvynskiy, V. D., & Bahach, R. V. (2024). Doslidzhennia litii-ionnykh batarei dlia ekspluatatsii elektromobiliamy pry riznykh temperaturnykh umovakh. [Study of lithium-ion batteries for electric vehicle operation under different temperature conditions.] ISSN 2074-2630 Naukovi pratsi DonNTU. Serii: «Elektrotekhnika i enerhetyka» №1(30)'2024. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2024-1-58-64> [in Ukrainian].*
 9. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312968
 10. Снегіре́в, В. О. (2018). Пристрій для дослідження впливу заряду асиметричним струмом на ємність акумуляторних батарей (Магістерська дисертація). Київ. *Sniehirov, V. O. (2018). Prystrii dlia doslidzhennia vplyvu zaryadu asymetrychnym strumom na yiemnist akumuliatornykh batarei. [Device for studying the impact of asymmetric current charging on the capacity of battery packs.] (Master's thesis). Kyiv [in Ukrainian].*
 11. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252-264.
 12. Багач, Р. (2024). Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (25), 53–62. *Bahach, R. (2024). Pidvyshchennia elektromahnitnoi sumisnosti i enerhoefektyvnosti zaryadnoi stantsii elektromobiliv. [Improving electromagnetic compatibility and energy efficiency of electric vehicle charging stations.] Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii*, (25), 53–62. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2024.25.0.6> [Ukrainian].
 13. Adkins, W. S. (2015). Автоматичний контролер PMG для малих додатків (Магістерська робота, Державний університет Райта).
 14. Копецький, М. М. (2023). Універсальний зарядний пристрій з мікроконтролерним керуванням. *Kopetskyi, M. M. (2023). Universalnyi zaryadnyi pristrii z mikrokontrolernym keruvanniam. [Universal charging device with microcontroller control.] [in Ukrainian].*
 15. Храпко, Д. О. (2023). Інтелектуальний зарядний пристрій для акумуляторів (Бакалаврська робота, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя). *Khrapko, D. O. (2023). Intelktualnyi zaryadnyi pristrii dlia akumulatoriv. [Intelligent battery charging device.] (Bachelor's thesis, Ternopil National Technical University named after Ivan Puluj) [in Ukrainian].*
 16. Кирилюк, Д. О. (2022). Розробка системи контролю рівня заряду батареї. *Kuryliuk, D. O. (2022). Rozrobka systemy kontroliu rivnia zaryadu batarei. [Development of a battery charge level monitoring system.] [in Ukrainian].*
 17. Ліпко, Д. О. (2020). Прилад для контролю параметрів акумуляторної батареї (Магістерська дисертація, КПІ ім. Ігоря Сікорського). *Lipko, D. O. (2020). Prylad dlia kontroliu parametriv akumulatornoi batarei. [Device for monitoring the parameters of a battery pack.] (Master's thesis, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute) [in Ukrainian].*
 18. Gonzalez-Castellanos, A. J., Pozo, D., & Bischi, A. (2019). Non-ideal linear operation model for li-ion batteries. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 672-682.
 19. Trinasolar. (n.d.). <https://www.trinasolar.com/us/product/residential>
 20. Amin, N., Lam, Z. Y., & Sopian, K. (2009). Microcontroller based smart charge controller for stand-alone solar photovoltaic power systems. У *Проц. IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*.
 21. Battery Space. (n.d.). <https://www.batteryspace.com/>
 22. Sandeep, M., & Deepika, A. (2019). Charging algorithms of lithium-ion batteries: an overview. У *International Conference on Innovative Research in Rfi*.
 23. Orobchuk, B., Sysak, I., Buniak, O., Babiuk, S., & Koval, V. (2023). Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. У *The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied*.
- Багач Руслан Володимирович**¹, доцент кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>
- Гнатів Андрій Вікторович**¹, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>
- Аргун Щасяна Валіковна**¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Simulation modeling of the LTC4020 charging controller for lithium-ion batteries

Abstract. Problem. Modern lithium-ion batteries are widely used in electric vehicles, medical devices, photovoltaic systems, and other fields due to their high energy density and efficiency. However, they require complex charging management to ensure safety, prevent degradation, and extend lifespan. Existing charging devices often have limitations in supporting a wide range of voltages and currents, as well as versatility in working with different types of batteries. **Goal.** To analyze and simulate the operation of the combined LTC4020 controller to optimize the charging process for lithium-ion batteries while ensuring high efficiency and safety. **Methodology.** The research utilized LTSpice software for the simulation of the LTC4020 controller. A lithium-ion battery model based on the Thevenin equivalent circuit was developed to balance accuracy and model complexity. The study focused on the controller's operation in the constant current-constant voltage (CC-CV) charging mode. **Results.** Simulations confirmed the effectiveness of the LTC4020 controller in providing precise regulation of current and voltage. The device demonstrated efficient charging of lithium-ion batteries across a wide range of input voltages (4.5 V–55 V), achieving energy efficiency of 90–97%. It was shown that maintaining the voltage range of 2.8–4.2 V is critical

to preventing battery degradation. **Originality.** The study proposed an optimized charging process based on the simulation of the LTC4020 controller using the Thevenin model for lithium-ion batteries. This research highlights the impact of charging device parameters on battery performance and durability, which has not been thoroughly addressed in previous studies. **Practical value.** The obtained results can be applied to the development of modern charging devices that provide high efficiency, versatility, and safety. This will promote the adoption of energy-efficient technologies in electric transportation, renewable energy, and portable electronics sectors.

Key words: Lithium-ion batteries, charging device, LTC4020 controller, simulation, energy efficiency, charging safety.

Bahach Ruslan¹, associate professor of the automotive electronics department, tel. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

Hnatov Andrii¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Arhun Shchasiana¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Система електродинамічного ретардеру подвійної дії

Бороденко Ю. М.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Складено класифікаційну структуру систем сповільнення автомобіля. Запропоновано технічне рішення електричного ретардеру, який являє композицію двох електричних машин, одна з яких являє генератор для рекуперації енергії гальмування. Розглядаються два підходи в реалізації конструкції спареного ретардеру – використання окремих машин або синтез суміщеного агрегату.

Ключові слова: система сповільнення, електродинамічний ретардер, гальма, рекуперація енергії гальмування, електрична машина з аксіальним магнітним потоком, трансмісія, баланс енергії.

Вступ

На автомобілі застосовуються гальмівні системи різного призначення: основна; аварійна; стоянкова; додаткова (сповільнення автомобіля). Системи гальм-сповільнювачів (гірських гальм) призначені для гальмування автомобіля при його русі під ухил з метою підтримки обмеженої швидкості переміщення рухомого складу без натискання на педаль гальма. Такі системи дозволяють запобігти перевантаженню робочої гальмівної системи перегріву і зношенню її гальмівних колодок через інтенсивну роботу під час руху автомобіля на тривалому спуску. Якщо, автомобіль часто експлуатується в гористій місцевості, то витрати на ремонт і обслуговування системи гальм різко зростають.

Використання електричних способів створення гальмівного моменту пов'язано з витратами електричної енергії транспортного засобу. Тому, одним з напрямків поліпшення енергетичних показників допоміжної гальмівної системи є застосування рекуперативних методів самозабезпечення.

Аналіз публікацій

На сьогодні розповсюдження набули системи сповільнення, які відрізняються за рядом класифікаційних ознак: механізмом дії системи; принципом дії та засобом керування ретардером; способом під'єднання гальма сповільнювача [1], рис. 1.

Перш за все, розрізняють моторні та трансмісійні системи. Перші, інвертують характеристику ДВЗ шляхом перетворення двигуна на компресор, за рахунок відключення подачі палива та перекриття випускної системи (компресійні системи) або зміни алгоритму роботи ГРМ (декомпресійні системи). Другі, використовують агрегат сповільнення (ретардер) в ланцюзі передачі моменту на колеса ведучого мосту. При цьому, залежно від місця встановлення розрізняють системи з первинними (до коробки передач) та вторинними (після коробки передач) ретардерами.

За принципом дії, ретардери з електричним керуванням можна поділити на газодинамічні, гідродинамічні та електродинамічні (магнітоіндукційні і електромагнітні) [2, 3].



Рис. 1. Класифікаційна структура систем сповільнення автомобіля

Газодинамічні ретардери застосовуються в моторних системах у вигляді газових заслінок (компресійні) або випускних клапанів ГРМ з пневмоелектричним приводом механізму корекції фази початку відкриття клапанів (декомпресійні) і за складом являють пневмоелектричні системи, рис. 2 [4, 5].



Рис. 2. Газодинамічні моторні сповільнювачі: а – компресійний; б – декомпресійний

Газова заслінка компресійного сповільнювача встановлюється на виході випускного колектору ДВЗ і в більшості випадків, керується пневматичним циліндром із застосуванням електроклапанів (рис. 2, а). Як альтернативні, можуть використовуватися гідроелектричний, електромагнітний (ЕМ) або сервопривід заслінки. Декомпресійна система сповільнення вбудована в газорозподільний механізм і отримала назву гальма Jake Brake (рис. 2, б). Принцип роботи такого моторного тормоза ґрунтується на скиданні тиску в циліндрі після такту стиснення за допомогою штатного випускного клапана ГРМ (при відключених паливних форсунках). Для цього, між штовхачем і стрижнем клапану ГРМ встановлюється проміжна ланка (штовхач і гідроциліндр з плунжером), яка змінює довжину што-

вхача під керуванням гідроелектричного клапана.

В результаті, активна фаза гальмування триває і на такті розширення, коли після закриття клапана ГРМ, в циліндрі створюється тиск розрідження (декомпресія). Jake Brake застосовується на вантажівках Freightliner (двигуни Cummins і Caterpillar) та DAF [3].

Гідродинамічні ретардери будуються за принципом гідромуфти, в якій крутний момент не передається як у гідротрансформаторі, а розсіюється у вигляді тепла. Керування силою сповільнення виконується шляхом зміни ступеня заповнення камер ретардера робочою рідиною (трансмісійною, охолоджуючою) під тиском, що створюється насосом з приводом від валу трансмісії. Контроль за подачею рідини і відповідно за швидкістю руху під час сповільнення, здійснюється за допомогою гідроелектричного блоку (електроклапанів) на підставі сигналів регулятора (здатчика) сповільнення, датчиків тиску рідини (масла) і датчика зворотного зв'язку (швидкості руху автомобіля).

Гідродинамічні ретардери з електричним керуванням задіюються, як трансмісійні та залежно від особливостей установки отримали різні назви (рис. 3) [6].

Офтардер являє окремий агрегат, який встановлюється в силовому агрегаті автомобіля на замовлення для виконання функції гірського гальма. Під'єднання/від'єднання офтардера до трансмісії здійснюється дистанційно через зубчасту передачу за допомогою електромагнітного приводу.

Інтардер безпосередньо вбудовується в конструкцію коробки передач з приводом від її вихідного валу (вторинне під'єднання). При

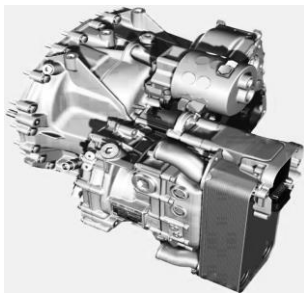
цьому, як робоче тіло використовується трансмісійне масло, а охолодження агрегату може здійснюватися через рідину системи охолодження ДВЗ.

Акватардер встановлюється спереду ДВЗ (первинне жорстке під'єднання до колінчастого валу). У якості робочої рідини в акватардері використовується охолоджуюча рідина замість трансмісійного масла.

Турбо-ретардер, поряд з основною функцією сповільнювача, забезпечує функцію гідравлічної муфти між ДВЗ і трансмісією, під час рушання завантаженого автомобіля. Це дозволяє розвинути максимальний крутний момент на валу ДВЗ (натискання на педаль акселератора) під опором гідродинамічного пристрою (на момент рушання) без зношення механічних елементів трансмісії. Процес підключення ретардера в турборежимі і перехід до режиму сповільнювача, здійснюється пневмогідравлічною системою з електричним керуванням.



а



б

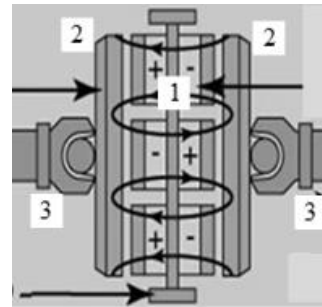


в

Рис. 3. Гідродинамічні сповільнювачі: а – офтардер; б – інтардер; в – акватардер

Магнітоіндукційний ретардер являє собою індукційні гальма, побудовані на ефекті генерації вихрових струмів. Ретардер складається з нерухомого статора з електромагнітами (індуктора 1) і пари роторів (феромагнітних дисків 2), з'єднаних з приводним валом 3, що їх обертає (рис. 4, а, б) [7].

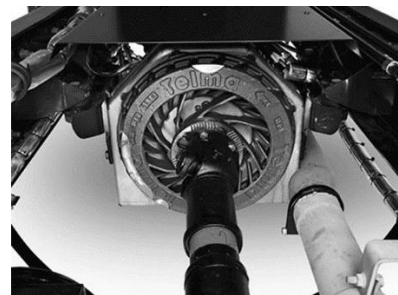
Промислові зразки магнітоіндукційних ретардерів характеризуються значним гальмівним моментом, що створюється силами електромагнітної взаємодії за рахунок моментів від полів вихрових струмів роторного диска і струмів в статорних котушках індуктора. Недоліком таких систем є витрата електричної енергії акумулятора для живлення котушок індуктора, яка перетворюється в позитивний гальмівний момент та негативні теплові втрати на нагрів роторного диску.



а



б



в

Рис. 4. Електродинамічний сповільнювач: а – принцип будови; б – вигляд; в – установка на рамі автомобіля

У якості електромагнітного ретардера можна розглядати вентильний генератор. При

цьому, гальмівний момент, створений на роторі генератора визначеної потужності, буде пропорційний силі струму його електричного навантаження.

Такий момент, зазвичай, недостатній для ефективного гальмування в обмеженому діапазоні нагрівання джерела і споживача електричної енергії. Поряд з цим, застосування гальмівних генераторів дозволяє реалізувати систему сповільнення, як рекуперативну.

В цьому випадку, найбільший інтерес викликають електричні машини з аксіальним магнітним потоком, де напрям магнітного потоку спрямовано вздовж осі обертання ротора. В такому разі, розміри робочого повітряного зазору машини визначає його діаметр, а не осьова довжина – двигун набуває дискової форми. Будова таких безколекторних машин передбачає розміщення друкованої (планарної) обмотки якоря на статорі та постійних магнітів збудження на роторі [7, 9, 10]. При цьому, розрізняють поверхневе SPMs (Surface Permanent Magnets) та вбудоване IPMs (Interior Permanent Magnets) кріплення магнітів на дисковому роторі [11, 12].

Підвищення потужності в таких машинах досягають збільшенням кількості статорів або роторів [13]. Традиційна конструкція машини з одним ротором та одним статором має меншу вагу та витрати матеріалів але, як наслідок це призводить до значних втрат на розсіювання магнітного потоку [8, 12]. Крайні енергетичні характеристики мають машини симетричної будови. Перший варіант, це машини SSDR (Single-Stator Double-Rotor), у яких два ротора розміщені з обох боків статора 1, 2 (рис. 5, а) [9, 14].

Другий варіант навпаки, має два статора, які діють на один ротор DSSR (Double-Stator Single-Rotor) (рис. 5, б) [15, 16].

На рис. 5 позначено: 1, 2 – ярмо ротора; 3 – планарні (друковані) котушки обмотки якоря; 4 – полюсні магніти ротора; 5 – немагнітна основа статора; 6 – полюсні зубці статора; 7 – ярмо статора.

Для машин структури DSSR необхідно застосовувати дискові магнітопроводи для створення замкнутої магнітної системи. Зменшення довжини робочого повітряного зазору і осьової довжини машини досягають шляхом застосування конструкцій статора де магнітопроводи мають зубці 6, які заходять у середину котушок обмотки якоря 3.

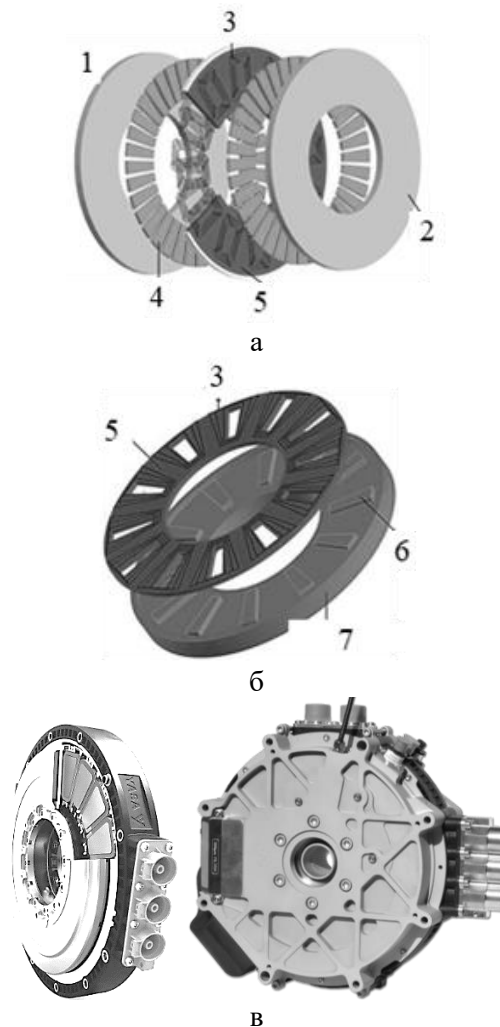


Рис. 5. Компонування аксіальної машини: а – структура SSDR, б – осердя статора з зубцями; в – зовнішній вигляд

Мета досліджень та постановка задачі

Мета роботи полягає у покращенні гальмівних характеристик системи сповільнення автомобіля (підвищення ефективності гальмування, стабілізації гальмівного моменту, керуваності процесом сповільнення, рекуперация енергії).

Основними напрямками вирішення цих задач є удосконалення конструкції ретардера і схеми системи керування гальмівними силами. Таким чином, ставиться задача – запропонувати технічне рішення системи електродинамічного ретардера з підвищеними енергетичними характеристиками, за рахунок використання процесів рекуперативної енергії під час сповільнення автомобіля при протяжному русі під ухил.

Синтез конструкції ретардери

Основним недоліком ретардерів магнітоіндукційної дії є значне споживання електричної енергії, що ставить конкуренцію іншим споживачам борта і потребує застосування генератора системи електропостачання автомобіля підвищеної потужності або АКБ підвищеної ємності. Щоб позбавитися цього недоліку і підвищити ефективність гальмування (гальмівної сили) системи сповільнення, пропонується доповнити конструкцію магнітоіндукційного ретардера автономним генератором для живлення сповільнювача [17]. При цьому, поряд з енергозбереженням, навантажений обмотками магнітоіндукційної частини ретардера генератор, буде створювати додатковий гальмівний момент на валу трансмісії (виконувати функції електродинамічного ретардера). Ідея використання двох суміщених машин була розглянута ще в 90-х роках.

Так, в [18] запропоновано технічне рішення суміщеної машини з синхронним трифазним вентильним генератором. Генератор, в цій конструкції, має електромагнітне збудження із живленням обмотки через контактні кільця. Вихід вентильного генератора, напряму підключений до обмоток сповільнювача. Керування гальмівною силою агрегату здійснюється регулятором струму збудження генератора.

Що стосується реалізації нової подвійної машини, можна розглядати два варіанти конструкції, які передбачають або застосування двох окремих агрегатів, або використання одного агрегату подвійної дії. В першому випадку, мінімізуються витрати на розробку системи але збільшується осьова довжина спареного агрегату і сумарна вартість електричних машин. В другому випадку, довжина синтезованого агрегату скорочується майже удвічі, але витрати на розробку суміщеного агрегату виходять на рівень промислового проекту.

Розглянемо перший варіант конструкції. У якості базового сповільнювача, обираємо магнітоіндукційний ретардер промислового зразка типу TELMA, який встановлюється у вторинному ланцюзі трансмісії (рис. 4, в) [3, 19].

До переваг TELMA-сповільнювачів слід віднести:

- підвищення безпеки за рахунок прийняття на себе значного зусилля гальмування;
- скорочення експлуатаційних витрат за рахунок більш тривалого терміну служби робочих гальм;

- відсутність впливу на навколишнього середовища за рахунок відсутності будь якого тертя та шкідливих викидів в атмосферу;

- підвищення комфортних умов для водія завдяки плавному гальмуванню і автоматичному керуванню;

- довгострокова надійність завдяки підвищеній міцності;

- максимальна ефективність через скорочення термінів окупності.

У якості генератора, за базову, обираємо дискову конструкцію синхронної трифазної машини зі збудженням від постійних магнітів (машина аксіального типу), яка характеризується високою питомою потужністю на малих обертах (рис. 5, в) [20].

За загальними класифікаційними ознаками (атрибутами) така машина ідентифікується як синхронна машина з поверхневою установкою постійних магнітів. Двигуни і генератори YASA, створені на основі унікальних (планарних) технологій, характеризуються високою питомою потужністю на малих обертах.

Наприклад, електродвигун YASA P400R номінальної потужності 100 кВт, який використовується в електромобілях, забезпечує до 200 Нм крутного моменту і частоту обертання до 8000 хв⁻¹ при осьовій довжині 0,084 м і діаметрі 0,3 м та вазі 24 кг [20]. Синхронний принцип будови дозволяє використовувати машину в генераторному режимі із застосуванням випрямляча. Мінімальна осьова довжина та низька швидкість обертання конвертованої машини, цілком задовольняють умовам під'єднання спареного агрегату до карданного валу.

В двигуні інтегровано датчик положення ротора і температурний сенсор. До того ж, конструкція агрегату дозволяє поєднувати двигуни в стик на спільному валу для підвищення крутного моменту і потужності.

Означені характеристики роблять машини YASA придатними для застосування у нашій системі. По-перше, машина має мінімальну осьову довжину, по-друге, - цілком задовольняє умовам швидкісного режиму трансмісії після коробки передач.

Основними елементами синтезованої конструкції спареного ретардера є: 1, 3 – індукційні диски ротора; 2 – котушки статорного індуктора; 4 – планарні якірні котушки статора генератора; 5 – роторний диск з планарними магнітами аксіального генератора (рис. 6).

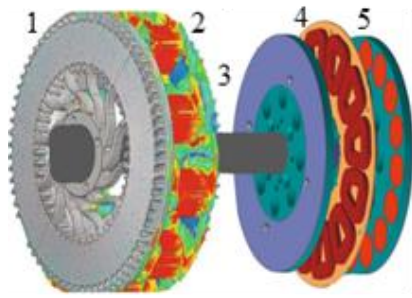


Рис. 6. Будова агрегату системи сповільнення подвійної дії

Подальше удосконалення конструкції ретардер-генератора полягає у застосуванні планарної технології в обох складових суміщеної машини. Слід зауважити, що додавання маси роторної частини подвійної машини збільшить її інерційність десь удвічі.

Для керування гальмівною силою, яку утворює подвійний ретардер (на відміну від [18]), використовується регулятор струму на виході вентильного генератора.

Якщо, оцінювати генераторну частину тандемної конструкції запропонованого ретардери на якісному рівні, було б доречно згадати недолік електричної машини зі збудженням від постійних магнітів, а саме утворення гальмівного моменту під постійною дією магнітного поля в контурі магнітної системи генератора. Це означає, що при русі автомобіля в штатному режимі (без гальмування і сповільнення), буде знижено ККД трансмісії.

Одним з способів компенсації таких втрат, є вмикання електричної машини в режимі двигуна. В такому разі, виникає потреба розглянути більш складну систему енергетичного балансу на рівні електричного мікрогібриду [21].

Відповіді на питання, щодо доцільності застосування аксіального генератора зі збудженням від постійних магнітів у складі тандемного ретардера, допоможуть тільки результати кількісного аналізу структурних параметрів і робочих характеристик обох машин ретардера і приводу автомобіля, як єдиної енергетичної системи. Причому, залежно від відносної потужності машин тандемного ретардера, виникає можливість отримання композиції силової установки автомобіля на рівні помірному і навіть повного гібриду [21]. В такому разі, друга частина спареного ретардера розглядається, як оборотна електрична машина з вентильним керуванням, а весь агрегат цілком, – як електропривод гібридної силової установки автомобіля з вбудованим магнітоіндукційним ретардером.

Висновки

Складено класифікаційну структуру систем сповільнення автомобіля.

Зроблено якісний аналіз техніко-експлуатаційних характеристик електромагнітного ретардера генераторного типу на базі машини з аксіальним магнітним потоком.

Запропоновано технічне рішення електричного ретардера, який являє композицію двох електричних машин, що забезпечують гальмівний момент подвійної дії із застосуванням рекуперованої енергії.

Означено необхідність кількісної оцінки балансу потужностей складових подвійної машини, яка дозволяє оптимізувати масо-габаритні показники суміщеного агрегату для визначеної гальмівної сили системи сповільнення.

Означено можливість трансформування композиції силової установки автомобіля с пасивним електромагнітним ретардером в схему помірному і навіть повного гібриду.

Визначено, що запропоноване технічне рішення, передбачає керованість процесом сповільнення (гальмівною силою), а отже стабілізацію гальмівного моменту та швидкості руху під уклін на заданому рівні і рекуперацію надлишкової енергії гальмування.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Бороденко, Ю. М., Гнатов, А. В., Аргун, Ш. В. (2024). Мехатронні системи автомобіля: підручник. М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Ч.2: Ходова частина. Харків: Мачулін. 228 с. Borodenko, Yu., Hnatov, A., & Argun, Sh. (2024). Mekhatronni systemy avtomobilia: pidruchnyk [Mechatronic Systems of the Automobile: Textbook]. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv National Automobile and Highway University. Part 2: Chassis. Kharkiv: Machulin. 228 p. [in Ukrainian]
2. What is a retarder? All you want to know. (2024). Retrieved from <https://www.truckcustom.com/what-is-a-retarder/>
3. Vehicle retarders: A review. (2021). Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10158685>
4. Ultimate guide: Learn all about Jake Brake. (2017). Retrieved from

- <https://www.fueloyal.com/ultimate-guide-learn-all-about-jake-brake/>
5. Допоміжна гальмівна система види і призначення. (н.д.). URL: <https://yak.koshachek.com/articles/dopomizhna-galmivna-sistema-vidi-i-priznachennja.html> (дата звернення: 22.08.2024). Dopomizhna halmivna sistema vydy i pryznachennia. (n.d.). Auxiliary braking system types and purposes. Retrieved August 22, 2024, from <https://yak.koshachek.com/articles/dopomizhna-galmivna-sistema-vidi-i-priznachennja.html> [In Ukrainian].
 6. Der Retarder ist nicht nur eine Dauerbremse. (2021). Retrieved August 22, 2023, from <https://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/brem sen/retarder.htm>
 7. Product presentation TELMA. TL101018. (n.d.). Retrieved August 22, 2023, from <http://telmausa.com/Downloads/TL101018.pdf>
 8. Paul, S., Farshadnia, M., & Pouramin, A. (2019). Comparative analysis of wave winding topologies and performance characteristics in ultra-thin printed circuit board axial-flux permanent magnet machine. *IET Electric Power Applications*, 13(5), 694–701.
 9. Wang, X., Li, X., & Li, C. (2019). Design of a PCB stator coreless axial flux permanent magnet synchronous motor based on a novel topology Halbach array. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 20(3), 414–424.
 10. Shen, Q., Yuan, X., & Chang, H. (2019). Four-phase flower-shape flexible stator winding of micro-motor. 2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), Glasgow, UK, pp. 1–3.
 11. Neethu, S., Nikam, S. P., Pal, S., et al. (2020). Performance comparison between PCB-stator and laminated-core-stator-based designs of axial flux permanent magnet motors for high-speed low-power applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5269–5277.
 12. Salim, N., Nikam, S. P., Pal, S., et al. (2019). Multiphysics analysis of printed circuit board winding for high-speed axial flux permanent magnet motor. *IET Electric Power Applications*, 13(6), 812–818.
 13. Нечаус, А. О. (2022). Обґрунтування можливості модернізації бортового автомобільного електрообладнання шляхом застосування двигунів з друкованими обмотками. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» 21-22 листопада 2022 р. [Електронний ресурс]. Харків: ХНАДУ. С. 7–9. Nechaus, A. (2022). Obhruntuvannia mozhlivosti modernizatsii bortovoho avtomobilnoho elektroobladnannia shliakhom zastosuvannia dvyguniv z drukovanymy obmotkami. [Justification for the possibility of modernizing automotive on-board electrical equipment through the use of motors with printed windings.] Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Online Conference "Vehicle and Electronics. Modern Technologies," November 21–22, 2022. Kharkiv: KhNAHU. pp. 7–9. [in Ukrainian]
 14. Lai, J., & Li, J. (2019). Analytical analysis of axial flux permanent magnet machines with air-gap winding. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, pp. 693–699.
 15. Verbeek, N., & Dehez, B. (2019). Comparison of inner and outer rotor configurations in shotless PM machines with PCB windings. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, pp. 1–7.
 16. Amin, S., Khan, S., & Bukhari, S. S. H. (2019). A comprehensive review on axial flux machines and its applications. 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, Pakistan, pp. 1–7.
 17. Бороденко, Ю. М., Тимошевський, Д. С., Лойко, С. О., Петрушинський, А. Н. (2022). Технічне рішення електромагнітного ретардери подвійної дії. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» 21-22 листопада 2022 р. Харків: ХНАДУ. С. 7–9. Borodenko, Yu., Tymoshevskiy, D., Loiko, S., & Petrushynskiy, A. (2022). Tekhnichne rishennia elektromahnitnoho retarderu podviinoi dii. [Technical solution for a dual-action electromagnetic retarder.] Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Online Conference "Vehicle and Electronics. Modern Technologies," November 21–22, 2022. Kharkiv: KhNAHU. pp. 7–9. [in Ukrainian]
 18. Assembly formed by an electromagnetic retarder and its electric supply means. (2021). Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US4864173A/en>
 19. TELMA electromagnetic braking axial retarders AX series. (2024). Retrieved from <https://www.oembusparts.com/products/chassis-component/retarder/telma-electromagnetic-braking-axial-retarders-ax-series.html>
 20. Electric motor technology company YASA acquired by Mercedes-Benz. (2024). Retrieved from <https://www.businesswire.com/news/home/20210722005414/en/Electric-Motor-Technology-Company-YASA-Acquired-by-Mercedes-Benz>
 21. Бороденко, Ю. М., Гнатов, А. В., Аргун, Ш. В. (2023). Мехатронні системи автомобіля: підручник. М-во освіти і науки України,

Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Ч.1: Силовий привід. Харків: Мачулін. 300 с. Borodenko, Yu., Hnatov, A., & Argun, Sh. (2023). Mekhatronni systemy avtomobilia: pidruchnyk [Mechatronic Systems of the Automobile: Textbook]. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv National Automobile and Highway University. Part 1: Powertrain. Kharkiv: Machulin. 300 p. [in Ukrainian]

Бороденко Юрій Миколайович¹, к.ф.-м.н.,
доцент кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: docentmaster@gmail.com,
тел.: +38 098-362-91-12,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2491-6799>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Double-action electrodynamic retarder system

Annotation. Problem: Issues related to increasing the performance characteristics of braking systems due to the use of car deceleration systems are considered. A structural analysis of car deceleration systems was performed according to a number of classification features: the system action mechanism; the principle of action and means of controlling the retarder; and the method of connecting the retarder brake. Ways of improving retarders based on the electrodynamic principle of construction are noted. The importance of improving the energy indicators of the pre-intermediate braking system due to the use of recuperative methods of self-sufficiency is emphasized. The **Relevance** of the study is determined by the increase in the number of motor vehicles involved in freight transportation in mountainous terrain. The **Goal** of the study is to improve the braking characteristics of the car's deceleration system under the conditions of a long descent.

The research **Methodology** includes the improvement of the retarder design and the scheme of the braking force control system. Based on the results of the study, a classification structure of car deceleration systems was compiled; a qualitative analysis of the technical and operational characteristics of the generator-type electromagnetic retarder with axial magnetic flux was made; a technical solution for an electrodynamic retarder is proposed, which comprises two electric machines that provide a double-action braking moment, using recovered energy. The need for a quantitative assessment of the power balance of the double machine's components is identified, which allows optimization of the mass-dimensional indicators of the combined unit for the determined braking force of the deceleration system. **Originality:** The trend of transforming the composition of the power plant of a car with a passive electromagnetic retarder into a moderate and even full hybrid scheme is highlighted. The **Practical Value** of the research is demonstrated through recommendations that can be useful in the design of new systems and adaptation of existing deceleration systems of motor vehicles, which are mainly operated in mountainous terrain.

Key words: deceleration system, electrodynamic retarder, brakes, recuperation of braking energy, electric machine with axial magnetic flux, transmission, energy balance.

Yuriy Borodenko¹, Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, Ph. D. (Phys.-Maht.), tel. 098-362-9112, e-mail: docentmaster@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2491-6799>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Оптимізована система управління бустерною літій-залізо-фосфатною акумуляторною батареєю

Аргун Щ.В.¹, Двадненко В.Я.¹, Гнатов А.В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У дослідженні розроблено бустерну батарею на основі літій-залізо-фосфатних акумуляторів з оптимізованою системою управління батареями (BMS), яка забезпечує ефективний контроль процесів заряду та розряду. Вона демонструє високу надійність, швидке зарядження та тривалий термін служби порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами. Вдосконалена BMS оптимізує внутрішній опір і балансування акумуляторних елементів, що забезпечує стабільне енергопостачання навіть у складних умовах експлуатації. Результати дослідження мають практичне значення для підвищення енергоефективності та надійності в автомобільній і суміжних галузях.

Ключові слова: літій-залізо-фосфатні акумулятори; система управління батареями; оптимізація процесів зарядки та розрядки; надійність акумуляторних систем, стійке електропостачання.

Вступ

Бустерна батарея – це багатофункціональний пристрій, який використовують для полегшення запуску автомобільного двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) в умовах низьких температур, а також при значному розряді автомобільного акумулятора [1,2]. Окрім того, бустерна батарея може слугувати джерелом живлення для різних електроприладів у ситуаціях, коли мережа змінного струму недоступна або відсутня.

Бустерні батареї, що складаються з послідовно з'єднаних елементів літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів, мають чудові енергетичні характеристики за питомою вагою та об'ємом, що забезпечує їх компактність і легкість [3,4]. Вони герметичні, мають високу кількість циклів заряд-розряд, відзначаються високою надійністю, низьким внутрішнім опором, підтримують швидку зарядку та дозволяють розряд великими струмами. Ці переваги роблять їх значно кращими у порівнянні зі свинцевими акумуляторами тієї ж ємності, а також зручними для транспортування, зберігання та використання в житлових приміщеннях.

Однак, як і всі літій-іонні акумулятори, бустерні батареї мають суворі вимоги щодо недопущення перезаряду та глибокого розряду. Особливо небезпечним є перерозряд із переполосовкою окремих елементів, коли повністю розряджений елемент починає заряджатися зворотною полярністю за рахунок струму від інших, ще не розряджених елементів. Крім того, зарядження літій-іонних акумуляторів при від'ємній температурі також неприпустиме. Ці особливості експлуатації потребують встановлення спеціальних електронних систем контролю, відомих як система управління батареєю (BMS – Battery Management System).

Аналіз публікацій

Останніми роками все більшу увагу приділяють розробці нових енергоефективних технологій, які поступово впроваджуються у різні сфери, зокрема в транспортну галузь [5]. Прогрес у цій галузі особливо помітний у сфері модернізації транспортних засобів, таких як автомобілі та залізничні системи, що дозволяє підвищити їхню ефективність та знизити вплив на довкілля [6]. Електромобілі стають одним із

основних напрямів розвитку, що вимагає удосконалення не тільки транспортної інфраструктури, а й систем електроприводу, електронних компонентів і акумуляторів.

Численні дослідження присвячені підвищенню продуктивності та надійності тягових електродвигунів. Наприклад, робота [7] розглядає методи діагностики електродвигунів електромобілів, тоді як дослідження [8] зосереджується на системах діагностики для гібридних транспортних засобів.

Окрім цього, важливим елементом розвитку є інфраструктурні рішення для зарядки електромобілів, а також системи, що забезпечують енергопостачання доріг та підвищують безпеку руху [9–11]. Не менш актуальними є виклики, пов'язані з кібербезпекою автомобільних систем, які можуть негативно вплинути на ефективність роботи автомобілів і загальну безпеку на дорогах [12].

Одним із найбільш затратних компонентів електромобілів є акумуляторні батареї, які можуть становити до третини загальної вартості транспортного засобу [13]. Літій-іонні та нікель-металогідридні батареї широко використовуються в електромобілях завдяки їхній довговічності, високій ефективності та щільності енергії [14]. Серед них популярними є літій-нікель-кобальт-оксид (NCA), літій-кобальт-оксид (LCO), літій-титанат-оксид (LTO), літій-манган-оксид (LMO), літій-нікель-оксид (LNO), літій-залізо-фосфатні (LFP) та літій-нікель-марганець-кобальт-оксид (NMC) [14].

Зокрема, літій-залізо-фосфатні (LFP) батареї вирізняються своєю компактністю, легкістю, герметичністю та великою кількістю циклів заряд-розряд [15]. Вони забезпечують можливість швидкої зарядки та здатні витримувати високі струми при розряді. Проте їх експлуатація вимагає суворого дотримання умов, таких як недопущення перезаряду або глибокого розряду окремих елементів. У таких випадках важливо використовувати систему управління батареєю (BMS), яка забезпечує моніторинг та захист елементів від перевантажень та перегріву [16].

У статті [17] проведено всебічний аналіз компонентів, архітектури та безпекових ризиків, пов'язаних із роботою BMS, представлено огляд технічних стандартів, які стосуються BMS, як частину ширших зусиль зі створення нового стандарту для цієї системи. В роботі підтверджується важливість дотримання цих стандартів. Зокрема, зазначено, що функціо-

нальна BMS повинна відповідати стандартам CSA, IEEE, UL, NEC та IEC для забезпечення валідації та дотримання вимог безпеки.

Таким чином, впровадження BMS дозволяє не тільки контролювати рівень заряду акумуляторів, але й продовжити термін їхньої служби, забезпечуючи надійну та ефективну роботу транспортних засобів.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розробка оптимальних електронних блоків, що контролюють режими заряду та розряду літій залізофосфатних акумуляторних батарей, що дозволить спростити та знизити собівартість зарядного пристрою та BMS, скоротити час заряду та балансування, забезпечити тривалий термін служби та високу надійність акумуляторної батареї.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз технічних вимог щодо експлуатації літій-залізо-фосфатних акумуляторів, зокрема визначити критичні параметри для заряду та розряду, такі як напруга, струм та температура;
- розробити електронні блоки системи управління батареями (BMS), що контролюють режими заряду та розряду акумуляторних батарей, з урахуванням особливостей LiFePO_4 акумуляторів;
- створити експериментальну модель зарядного пристрою, яка забезпечує оптимізацію процесів заряду та балансування акумуляторів з метою скорочення часу зарядки та підвищення ефективності роботи системи;
- дослідити вплив внутрішнього опору акумуляторів на порогові напруги завершення процесів заряду та розряду, розробити підходи до балансування акумуляторних банок для підвищення їх надійності;
- провести експериментальні випробування розробленої системи управління батареями з метою підтвердження її ефективності, надійності та можливості тривалого використання в реальних умовах експлуатації.

Технічні вимоги при експлуатації LiFePO_4 акумуляторів

Експлуатація LiFePO_4 акумуляторів потребує дотримання кількох важливих технічних вимог для забезпечення їхньої надійної роботи

та тривалого терміну служби:

- максимальна напруга при заряді не повинна перевищувати 3,65 В на елемент, а напруга при розряді не повинна падати нижче 2,5 В. Це критичні параметри, недотримання яких може призвести до пошкодження елементів акумулятора;

- граничні значення струмів заряду і розряду задаються у вигляді коефіцієнта, який визначається відносно ємності акумулятора і зазвичай вказується у [А·год]. Ці значення залежать від конструктивних особливостей акумуляторних елементів і можуть варіюватися в залежності від специфікацій конкретної моделі. Важливо також враховувати тривалість дії зарядних і розрядних струмів: при збільшенні струму тривалість його дії повинна зменшуватися, щоб уникнути перегріву;

- температурний контроль є важливим параметром під час експлуатації, оскільки при її перевищенні слід знижувати струм заряду. В умовах великих розрядних струмів, особливо в електромобілях, також важливо обмежувати струм розряду при надмірному нагріві елементів. У деяких випадках для охолодження акумуляторів використовують примусову систему охолодження;

- для забезпечення безпечної роботи акумуляторів за низьких температур, перед початком заряду необхідно здійснювати попередній підігрів елементів до позитивної температури за допомогою електричних нагрівачів. Це особливо актуально для автомобільних акумуляторів, які експлуатуються у складних кліматичних умовах.

Дотримання цих технічних вимог є ключовим для забезпечення безпечної експлуатації LiFePO₄ акумуляторів, продовження їхнього терміну служби та запобігання пошкодженням під час роботи.

Вибір та обґрунтування вимог до схемотехніки бустера

Вибір акумулятора здійснюється з урахуванням:

- стартового струму автомобіля (який, як правило, є короткочасним, менше 6 с);
- ваги (для зручності транспортування);
- запасу електричної енергії (якщо використовується для освітлення житлових приміщень або живлення побутових електроприладів).

Для легкового автомобіля з бортовою мережею на 12 В достатньо послідовно з'єднати 4 банки (або 4 паралельні збірки) літій-залізо-фосфатних банок. Стартовий струм під час запуску (< 6 с) для бензинового легкового автомобіля (100–160 А) забезпечать чотири паралельні збірки з чотирьох банок LiFePO₄, типорозміру 32700, ємністю 6 А·год, з загальною ємністю 24 А·год.

Для тривалого живлення побутових приладів, таких як настільні комп'ютери, підходять LiFePO₄ акумулятори ємністю 60–100 А·год [18].

Для досягнення поставленої мети треба проаналізувати часові характеристики заряду та розряду, розглянути вольт-амперні характеристики, функціональні залежності впливу внутрішнього опору елементів батареї під час заряду та розряду.

Зарядна характеристика елемента LiFePO₄ типорозміру 32700 ємністю 6 А·год наведена на рис. 1. По осі абсцис зазначено час заряду (год, хв, с), по осі ординат зліва – напруга, справа – струм заряду елемента. Червона лінія показує залежність струму заряду, синя – напругу елемента. Як видно з рисунку, заряд виконується струмом 0,5С, який підтримується до досягнення граничної напруги заряду 3,65 В. Після цього напруга стабілізується, а струм починає знижуватися. Електричний заряд Q , переданий акумулятору, можна записати у вигляді виразу:

$$Q = \int_{t_2}^{t_1} I(t) dt, \quad (1)$$

де t_1 і t_2 – час початку та кінця зарядки відповідно; $I(t)$ – зарядний струм, що залежить від часу.

Накопичену енергію, нехтуючи втратами, оскільки ККД LiFePO₄ акумулятора перевищує 97%, можна записати як:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} I(t)U(t)dt, \quad (2)$$

де $U(t)$ – напруга акумулятора, що залежить від часу.

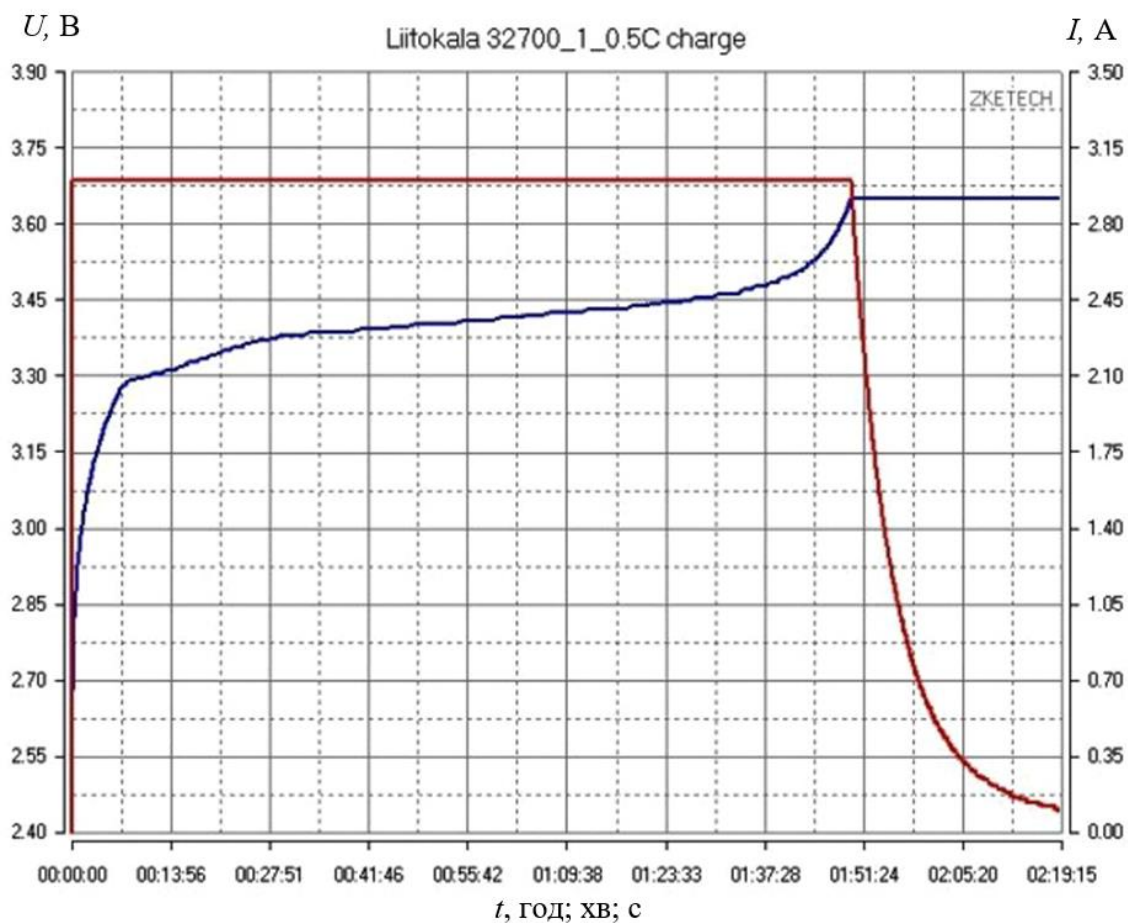


Рис. 1. Зарядка банки акумулятора

Таким чином, як видно з (1), площа під кривою струму в залежності від часу показує заряд акумулятора, який можна виміряти в кулонах $[A \cdot c]$ або ампер-годинах $[A \cdot год]$. Легко обчислити заряд, отриманий акумулятором під час стабілізації струму та напруги за рис. 1. Після досягнення граничної напруги заряд можна збільшити менше ніж на 9% при подальшому заряді зі стабілізованою напругою, але це збільшує час заряду більше ніж на 25%. Оскільки всі виробники рекомендують підтримувати глибину розряду (DOD) нижче 100% і не заряджати акумулятор на всі 100%, можна спростити зарядний пристрій, відмовившись від дозарядки зі стабілізацією напруги. Найкраще дотримуватися рівня розряду до 80% або менше. Простіше кажучи, чим менший рівень розряду (DOD), тим більше циклів "заряд-розряд" можна виконати. При 50% DOD елементи $LiFePO_4$ можуть витримати понад 5000 циклів. Однак важливо підтримувати DOD у середньому діапазоні ємності, тобто не розряджати і не заряджати акумулятор на всі

100%, інакше кількість циклів "заряд-розряд" може зменшитися.

Розглянемо розрядну характеристику, наведену на рис. 2.

Розряд проводився стабілізованим струмом 2 A і завершився після зниження напруги акумулятора до 2,5 V. Для цієї залежності проведено оцінку, використовуючи формулу (2), енергії, отриманої під час розряду акумулятора. Оцінювалась енергія (у джоулях або в $kWh \cdot год$) графічно, виходячи з того, що площа під кривою напруги на рис. 2 прямо пропорційна енергії розряду. Видно, що падіння напруги прискорюється наприкінці розряду, через що 90% енергії розряду отримується до того, як напруга акумулятора знизиться до 3,1 V, тобто менш ніж на 5%. Ця особливість $LiFePO_4$ акумулятора є сприятливою для споживачів, оскільки забезпечує невеликі зміни потужності навіть при майже повному розряді (до 10%) і дозволяє надійно завершувати процес розряду, не завдаючи шкоди акумулятору.

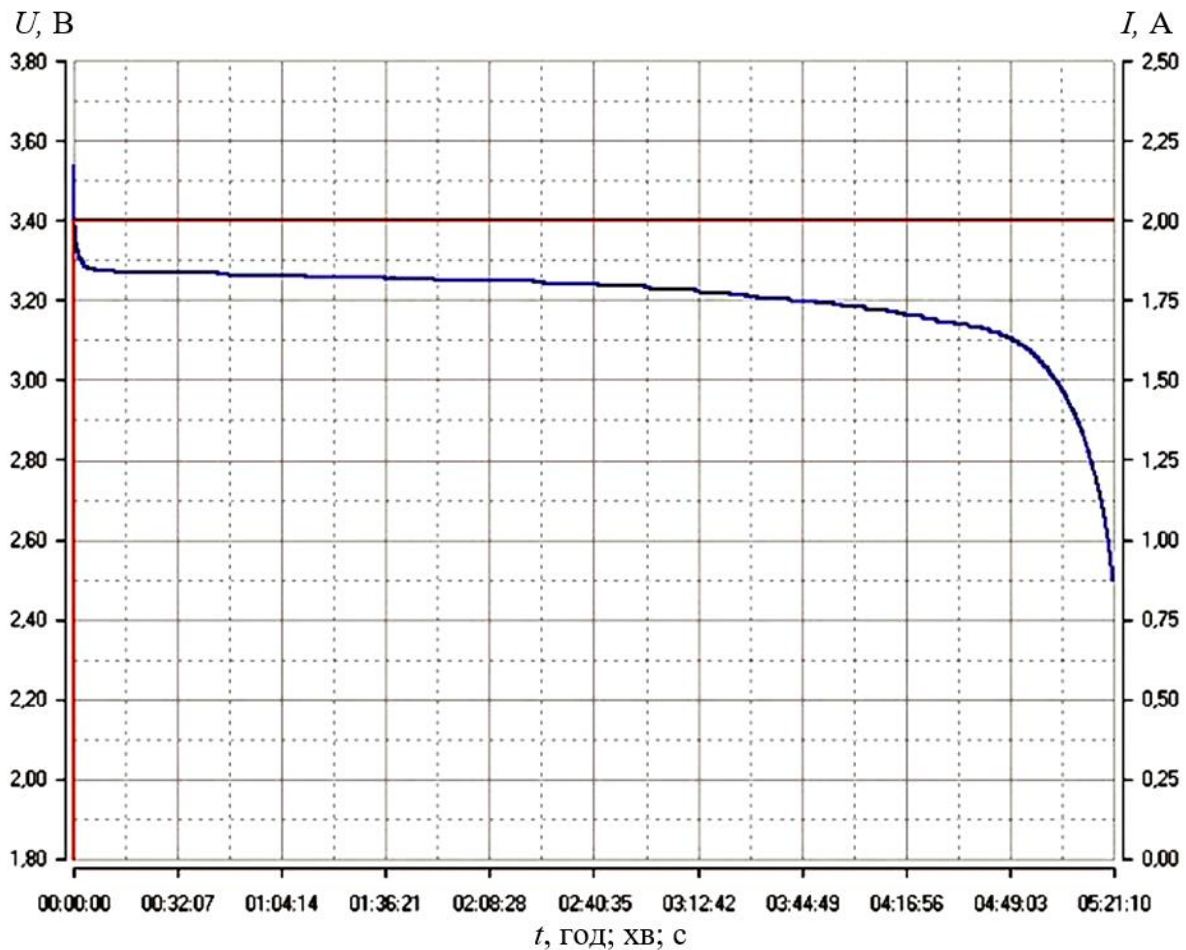


Рис. 2. Розрядна характеристика акумулятора

Зупинимось на виборі порогових напруг для завершення процесів заряду та розряду та впливі внутрішнього опору акумулятора на ці пороги. Реальна напруга завершення заряду U_{ech} буде:

$$U_{ech} = 3,65 - I_{ch} \cdot r, \quad (3)$$

де I_{ch} – струм зарядки; r – внутрішній опір акумулятора.

Оскільки:

$$I_{ch} = \frac{U_1 - U_2}{r + R},$$

де U_1 – напруга зарядного пристрою; U_2 – напруга акумулятора; R – внутрішній опір зарядного пристрою плюс опір ланцюга зарядки.

Як результат маємо:

$$U_{ech} = 3,65 - \frac{(U_1 - U_2) \cdot R}{r + R}.$$

Напруга зарядного пристрою U_1 для акумуляторної батареї, що складається з n банок, може бути обраною як 3,65n В, але її можна вибрати трохи більшою, тоді наприкінці зарядки зниження зарядного струму буде меншим, а процес зарядки прискориться.

Для порогової напруги завершення розряду однієї банки акумулятора маємо:

$$U_{ech} = 2.5 + I_d r. \quad (4)$$

Через високу швидкість зміни напруги наприкінці заряду і розряду, незначні відхилення порогової напруги у менший бік під час заряду та у більший під час розряду мало впливають на надійність відключення заряду або розряду акумулятора. Такі відхилення, викликані падінням напруги на внутрішньому опорі акумулятора при великих або малих

струмах заряду чи розряду, не створюють проблем для експлуатації акумулятора.

Внутрішній опір акумулятора невеликий і змінюється незначно під час роботи, лише наприкінці розряду він починає збільшуватись. Наприклад, експериментально вимірний внутрішній опір LiFePO_4 акумулятора типорозміру AA (14500) ємністю $0,7 \text{ А}\cdot\text{год}$ під час розряду до напруги $2,5 \text{ В}$ зріс до $0,525 \text{ Ом}$, тоді як протягом основного часу розряду він становив близько $0,38 \text{ Ом}$. Таке збільшення внутрішнього опору LiFePO_4 акумулятора також прискорює відключення навантаження системою BMS наприкінці розряду батареї.

Тепер розглянемо оптимальний, на нашу думку, підхід до балансування LiFePO_4 акумуляторних батарей. Обов'язковою вимогою є те, щоб електронні схеми BMS контролювали граничні напруги заряду та розряду кожного елемента батареї з подальшим відключенням струму заряду або розряду. Це призводить до того, що ємність батареї стає рівною ємності найменшого за ємністю елемента. Це пояснюється тим, що через всі елементи послідовно з'єднаної батареї проходить однаковий струм, і час заряду або розряду для всіх елементів однаковий. У традиційних, найбільш поширених пасивних BMS балансування здійснюється шляхом повного заряду кожного елемента батареї. Це досягається або підключенням розрядного резистора паралельно елементам, які раніше досягають повного заряду, або окремою дозарядкою елементів, що відстають.

Однак така повністю заряджена батарея при розряді може віддати тільки ту кількість електроенергії, яку здатен віддати найменший за ємністю елемент, що визначається за формулою (2), де $U(t)$ – напруга всієї батареї, а t_1 і t_2 визначаються часом роботи найменшого за ємністю елемента. Розряд до відключення при повному розряді найменшого за ємністю елемента забезпечить однакову кількість електроенергії для всіх банок батареї, оскільки через усі банки протікає однаковий струм протягом однакового часу. Після будь-якого розряду, у всіх банках буде однаковий обсяг вільного простору для заряду. Під час заряду через всі банки також протікає однаковий зарядний струм, і всі банки заряджаються одночасно під керуванням BMS.

Таким чином, максимальну ємність батареї з різною ємністю елементів можна досяг-

ти без балансування, достатньо мати BMS з функцією відключення заряду та розряду при досягненні граничних значень напруги.

При тривалому зберіганні батареї без зарядки може спостерігатися різний рівень саморозряду елементів, що призведе до видимого зниження ємності батареї, оскільки елементи з меншим саморозрядом будуть заряджатися раніше, і через це в них буде менше місця для заряду, ніж у елементів із більшим саморозрядом. Тому після тривалого зберігання, наприклад більше одного року, необхідно кожен елемент окремо або зарядити до максимальної допустимої напруги, або розрядити до мінімально допустимої напруги. Однак через те, що саморозряд у LiFePO_4 акумуляторів дуже малий, цей процес не спричиняє значних проблем.

Зазначений принцип розробки BMS спрощує її конструкцію порівняно з традиційними пасивними системами BMS. Активне балансування значно ускладнює систему BMS, підвищує її вартість і призводить до більш глибокого розряду всіх банок батареї, що зрештою скорочує термін її служби.

Практична реалізація електронного блока для бустерної батареї на основі LiFePO_4 акумуляторів

Розглянутий підхід до оптимізації BMS для LiFePO_4 акумуляторних батарей був застосований для створення електронного блока, який контролює режими заряду та розряду у бустерній батареї на основі LiFePO_4 акумуляторів. Такий бустер, що складається з чотирьох банок WB-LYP90AHA ємністю $90 \text{ А}\cdot\text{год}$, підходить як для запуску бензинових і дизельних ДВЗ, так і для живлення побутових приладів під час тривалих відключень централізованого електропостачання. Враховувалось, що після повного заряду акумулятора його енергетичний запас становить $1,188 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, тому необхідно оцінювати потужність навантаження та час його роботи.

Для підвищення надійності, захисту від перешкод та точності рекомендується вимірювати напругу кожної банки акумулятора окремо, а не розраховувати на основі напруг від загального проводу. Блок для визначення напруги на кожній банці має бути простим і містити мінімум компонентів.

На рис. 3 показана структурна схема з'єд-

нань блоків бустера:

Блок 1 – блок контролю однієї банки акумулятора;

Блок 2 – блок відключення батареї;

Блок 3 – мережевий зарядний пристрій для автомобільного акумулятора з вихідною стабілізованою напругою 14,4 В;

Інвертор, блок перетворення постійної напруги на змінну (Tataliken 12V 2500W із

синусоїдальною вихідною напругою 220 В), на рис. 3 не показаний, оскільки його вхід безпосередньо під'єднується до акумулятора короткими проводами великого перерізу за допомогою потужних затискачів.

Під час використання пристрою для запуску автомобіля інвертор і зарядний пристрій від'єднуються від бустера.

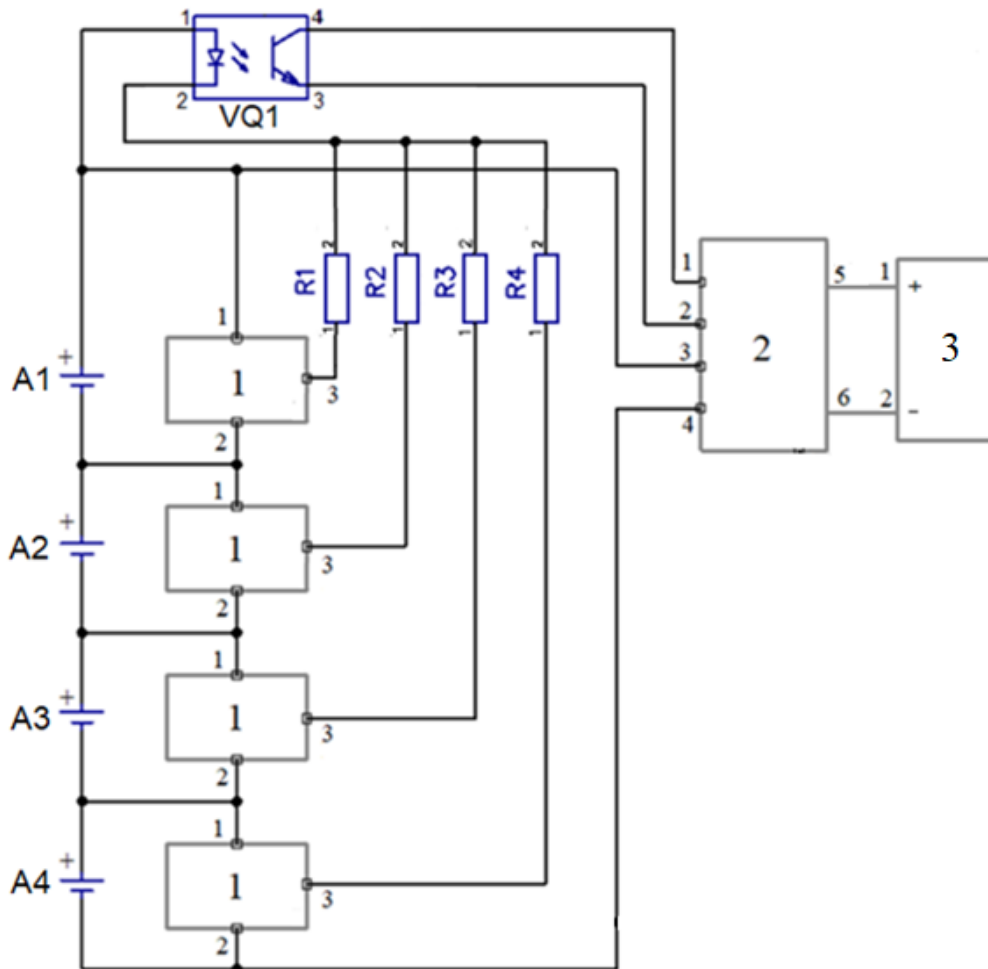


Рис. 3. Структурна схема блоків бустера

Робота пристрою в режимі зарядки акумулятора, який складається з чотирьох банок A1 – A4 (рис. 3).

Схема блока контролю однієї банки наведена на рис. 4. Ця схема забезпечує короткочасне увімкнення струму через світлодіод оптрона (VQ1 на рис. 3), як при завершенні заряду, так і при завершенні розряду.

На схемі блока 2 (рис. 5) транзистори Q1 та Q2 утворюють засувку, яку потрібно активувати натисканням на кнопку S1 перед зарядкою або розрядкою. Після цього через

обмотку реле K1 починає проходити струм. При цьому нормально розімкнуті контакти реле K1.1 замикаються, і таким чином виводи 5 і 3 блока 2 – замкнуті. Через них буде проходити струм зарядки акумулятора (рис. 3).

Перед завершенням зарядки напруга на банці досягає 3,6 – 3,65 В, а через дільник на R5, R6, R7 (рис. 4) напруга досягає рівня пробою червоного світлодіода D2, який працює як стабілітрон. Це призводить до відкриття транзистора Q3.

Струм транзистора Q3 через гальванічну

розв'язку на оптроні VQ1 передає сигнал на блок 2 (рис. 3), де через відкритий транзистор оптрона проходить струм, що відкриває транзистор Q1 (рис. 5). Транзистор Q1 шун-

тує емітерний перехід транзистора Q2, що призводить до знеструмлення обмотки реле і відключення зарядки.

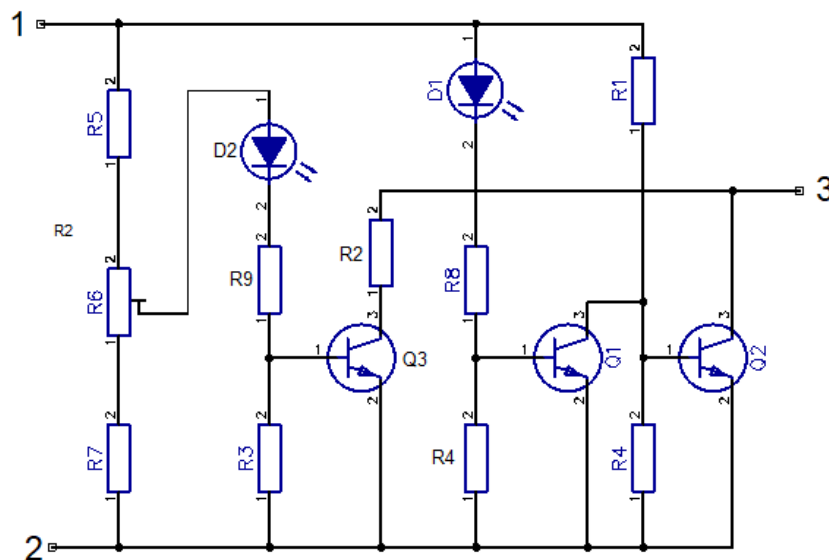


Рис. 4. Блок контролю однієї банки акумулятора: U1 – TL431; R1 – 2 кОм; R2 – 55-220 Ом; R3 = R4 – 10 кОм; R5 – 3 кОм; R6 – 5 кОм; R7 – 4,7 кОм; R8=R9 – 10 кОм; D1, D2 – червоний світлодіод

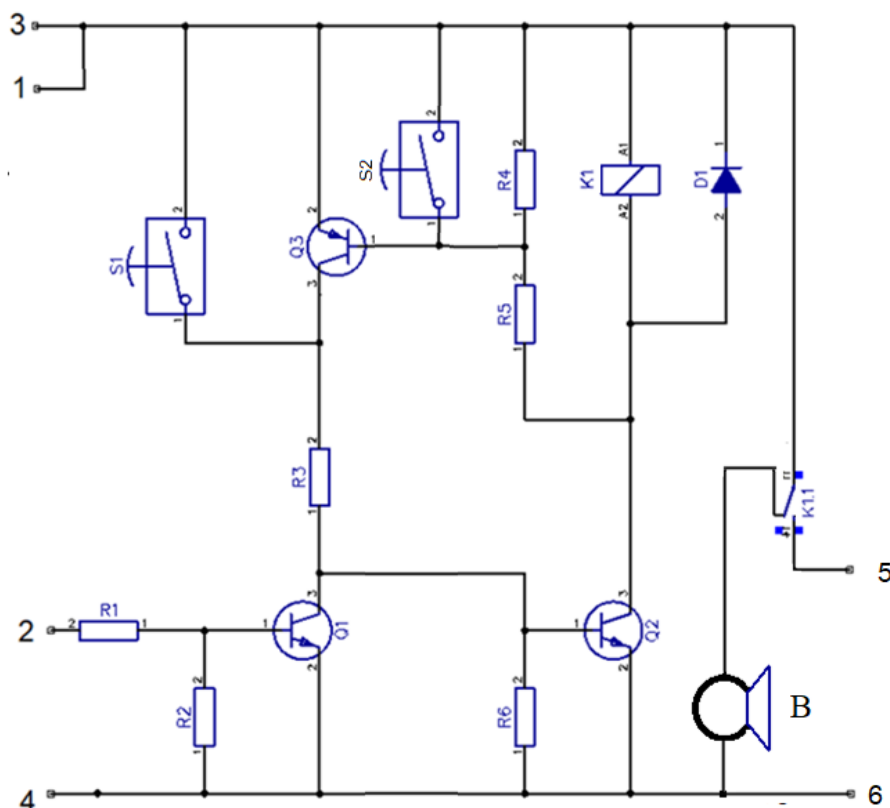


Рис. 5. Блок вимикання батареї. Q1 – BC 547C; Q2 – BC 547C; Q3 – BC 557C; R1 – 10 кОм; R2 – 10 кОм; R3 – 2 кОм; R4 – 2 кОм; R5 – 2 кОм; R6 – 2 кОм; K1 – реле 12В,10А; D1 – 1N4007; S1 – кнопка set; S2 – кнопка reset; B – бузер 12 В

У разі необхідності підключення інвертора його приєднують безпосередньо до клем акумулятора і лише після цього вмикають інвертор його штатним вимикачем. Така процедура потрібна, оскільки клеми інвертора на 12 В з'єднані з конденсаторами великої ємності, які не комутуються вимикачем інвертора. Це зроблено для того, щоб запобігти високому струмовому навантаженню при зарядці конденсаторів від акумулятора з низьким внутрішнім опором, яке може перевищити допустимий струм для контактів вимикача.

Під час розряду акумулятора в блоці контролю однієї банки напруга поступово знижується. Коли струм через червоний світлодіод D1, який використовується як стабілітрон, і емітерний перехід транзистора Q1 починає різко зменшуватися, транзистор Q1 перестає шунтувати емітерний перехід транзистора Q2. Транзистор Q2 починає проводити струм через один із резисторів R1 – R4 (рис. 3) через світлодіод оптрона VQ1. Опір резисторів R1 – R4 (рис. 3) вибрано таким чином, щоб струм був приблизно 20 мА. Враховано, що струм через конкретний резистор залежить від кількості банок із напругою 2,5 В, які забезпечують цей струм. Для того, щоб струм через світлодіод оптрона VQ1 був близько 20 мА, і для забезпечення відключення зарядки при напрузі банок приблизно 3,6 В, вибирається резистор R2 у блоці контролю однієї банки акумулятора (рис. 4).

При граничному розряді однієї з банок акумуляторної батареї струм через світлодіод оптрона VQ1 також призводить до переключення контактів реле K1.1 і подачі звукового сигналу бузером В (рис. 5). Цей сигнал вказує на необхідність відключення розряду батареї. Звуковий сигнал відключають натисканням на кнопку S2 (рис. 5).

Висновки

У ході виконання поставлених задач було розроблено та протестовано систему управління літій-залізо-фосфатними (LiFePO₄) акумуляторними батареями, яка дозволяє ефективно контролювати режими заряду та розряду, зберігаючи надійність та тривалий термін служби батарей. Було проаналізовано критичні параметри експлуатації акумуляторів, такі як напруга, струм і температура, що

дозволило запобігти пошкодженням батарей та забезпечити їхню безпечну роботу.

Розроблена система управління батареями (BMS) оптимізує процеси заряду і балансування акумуляторних банок, що сприяло значному скороченню часу заряду і підвищенню ефективності роботи системи. Особливо досліджено вплив внутрішнього опору акумуляторів на процеси заряду та розряду, що дозволило вдосконалити алгоритми балансування батарей для підвищення їхньої надійності та продовження терміну служби.

Експериментальні випробування підтвердили ефективність розробленої системи, зокрема її здатність забезпечувати стабільну роботу акумуляторів навіть в умовах значних навантажень. Це свідчить про те, що запропонована система управління батареями має високий потенціал для впровадження в практичних застосуваннях, особливо в умовах, що потребують надійного і швидкого живлення.

Таким чином, розроблена система управління літій-залізо-фосфатними акумуляторами забезпечує не тільки покращену ефективність і надійність, але й може стати основою для подальшого вдосконалення енергетичних систем у транспортній галузі та інших сферах, що використовують подібні джерела живлення.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Uchendu, I., Xiao, T., Lu, Y., Zhu, B., Yan, M., Simon, J., Bennice, M., Fu, C., Ma, C., & Jiao, J. (2023). Jump-start reinforcement learning. *International Conference on Machine Learning*, 34556–34583. <https://proceedings.mlr.press/v202/uchendu23a.html>
2. Prudius, T. Y., Gutsol, A. V., Gutsol, N. V., & Mysenko, O. O. (2021). Globigen Jump Start usage as a replacer for blood plasma in prestarter feed for piglets. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*, 23(94), 111–116.
3. Torrealba, J. (2020). *Autonomous cell-based LiFePO₄ battery management system for solar photovoltaic applications*. <https://islandscholar.ca/islandora/object/ir%3A23559/datastream/PDF/view>

4. Roviato, E., Khairunnisa, B. W. L., Fardan, M. F., Harsito, C., & Prasetyo, A. (2024). Balancing the charge: The evolution of battery active equalizers in shaping a sustainable energy storage future. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 15(3), 1687–1710.
 5. Arhun, S., Hnatov, A., Hnatova, H., Patlins, A., & Kunicina, N. (2020). *Problems that have arisen in universities in connection with COVID-19 on the example of the Double Degree Master's Program "Electric Vehicles and Energy-Saving Technologies."* 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316601>
 6. Bogajevskiy, A., Arhun, S., Hnatov, A., Dvadenko, V., Kunicina, N., & Patlins, A. (2019, October 7). Selection of Methods for Modernizing the Regulator of the Rotation Frequency of Locomotive Diesels. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. <https://doi.org/10.1109/RTUCON48111.2019.8982347>
 7. Arhun, S., Borodenko, Y., Hnatov, A., Popova, A., Hnatova, H., Kunicina, N., Ziravecka, A., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2020). Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(4), 3–11. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0017>
 8. Borodenko, Y., Ribickis, L., Zabasta, A., Arhun, S., Kunicina, N., Zhiravetska, A., Hnatova, H., Hnatov, A., Patlins, A., & Kunicins, K. (2020). Using the method of the spectral analysis in diagnostics of electrical process of propulsion systems power supply in electric car. *Przeglad Elektrotechniczny*, 96(10), 47–50. <https://doi.org/10.15199/48.2020.10.08>
 9. Hnatov, A., Arhun, S., Dziubenko, O., & Poniarovska, S. (2018). Choice of electric engines connection circuits in electric machine unit of electric power generation device. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 12(4), 85–93.
 10. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 248–253. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236606>
 11. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). *Using of green energy from sustainable pavement plates for lighting bikeways. 2018-Octob-3-5, 574-579.* <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/27845>
 12. Klets, D., Gritsuk, I. V., Makovetskyi, A., Bulgakov, N., Podrigalo, M., Kyrychenko, I., Volska, O., & Kyzminec, N. (2018). Information Security Risk Management of Vehicles. *SAE Technical Papers*, 2018-April. Scopus. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>
 13. König, A., Nicoletti, L., Schröder, D., Wolff, S., Waclaw, A., & Lienkamp, M. (2021). An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/wevj12010021>
 14. Thangavel, S., Mohanraj, D., Girijaprasanna, T., Raju, S., Dhanamjayulu, C., & Muyeen, S. M. (2023). A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors. *IEEE Access*, 11, 20994–21019. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250221>
 15. Tran, M.-K., DaCosta, A., Mevawalla, A., Panchal, S., & Fowler, M. (2021). Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. *Batteries*, 7(3), 51.
 16. Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110015.
 17. Gabbar, H. A., Othman, A. M., & Abdussami, M. R. (2021). Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards. *Technologies*, 9(2), 28.
 18. *Прустрій для автомобіля PowerMe Jump Starter (PWM-JS1000)—BERI.UA. Інтернет-магазин.* (2024, June 5). *Prystrii dlia avtomobilia PowerMe Jump Starter (PWM-JS1000)—BERI.UA [Device for the car PowerMe Jump Starter (PWM-JS1000)—BERI.UA].* Internet-mahazyn. (2024, June 5). <https://beri.ua/puskovoe-ustroistvo-dlia-avtomobilya-powerme-jump-starter-pwm-js1000/> [in Ukrainian]
- Аргун Щасяна Валіковна**¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>
- Двадненко Владимир Яковлевич**¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 067-733-04-41, dvadnenkovladimir@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6634-343>
- Гнатів Андрій Вікторович**¹, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Optimized control system for a booster lithium-iron-phosphate battery

Abstract. Problem. Conventional lead-acid batteries suffer from significant limitations such as low energy density, reduced reliability over time, and inefficiency under challenging conditions like low temperatures and deep discharge. These limitations highlight the necessity of more efficient, lightweight, and durable alternatives for applications like starting internal combustion engines (ICE) and providing backup power. **Methodology.** This research focuses on designing and testing an optimized battery management system (BMS) for lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) batteries. Key performance parameters, including voltage, current, and temperature, were analyzed. An advanced electronic control unit was developed to regulate charging and discharging processes, with a focus on internal resistance management and cell balancing. Experimental validation was performed under various conditions, including low temperatures and heavy loads, to ensure robust performance. **Results.** The developed system demonstrated superior reliability, reduced charging times, and longer lifespan compared to conventional batteries. The optimized BMS ensured stable energy output, effectively balancing the charge and managing internal resistance. This system provided consistent performance even under extreme conditions, making it more cost-effective and durable. **Originality.** This study introduces a novel approach to controlling LiFePO₄ battery systems using advanced BMS technology, addressing specific challenges in ICE startups and auxiliary power applications. It

integrates enhanced temperature management, internal resistance monitoring, and charge balancing, providing a tailored solution for demanding environments. **Practical value.** The findings have practical implications for improving energy efficiency and reliability in automotive and other industries. The enhanced performance and extended lifespan of LiFePO₄ batteries make them ideal for critical applications, such as renewable energy storage and backup power systems, supporting the broader adoption of sustainable energy technologies.

Key words: lithium-iron-phosphate batteries; battery management system; optimization of charging and discharging processes; reliability of battery systems, stable power supply.

Arhun Shchasiana¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Dvadnenko Vladimir¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, e-mail: dvadnenkovladimir@gmail.com, tel. +38 067-733-04-41, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6634-3431>

Hnatov Andrii¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

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):

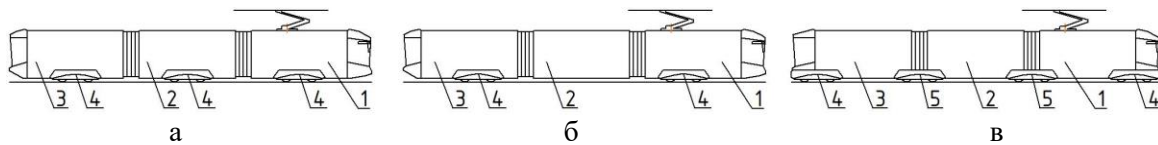


Рис. 1. Компоувальні схеми багатосекційних ЗТВ: а – послідовного типу; б – геометричного типу; в – проміжного типу (1 – секція передня з відділенням водія; 2 – проміжна секція; 3 – кінцева секція; 4 – двовісний колісний візок (неповоротний або поворотний); 5 – двовісний колісний візок Якобса)

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

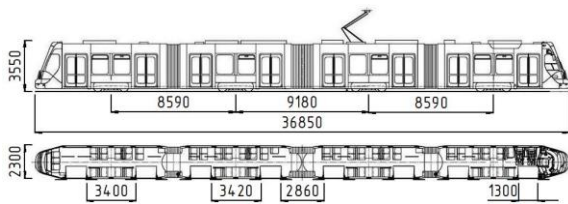


Рис. 2. Чотирисекційний ЗТВ моделі Siemens Avenio T1, створений на основі послідовної компоувальної схеми

- 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).

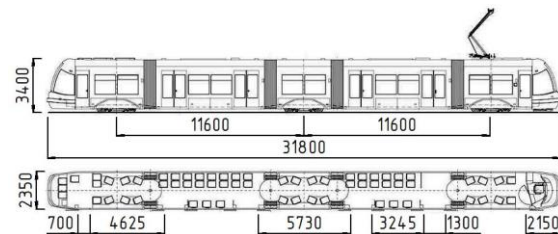


Рис. 3. П'ятисекційний ЗТВ моделі PESA 120N, створений на основі геометричної компоувальної схеми

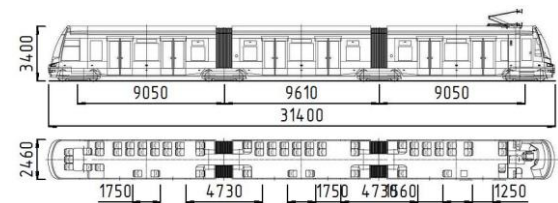


Рис. 4. Трисекційний ЗТВ моделі Skoda ForCity Alfa, створений на основі проміжної компоувальної схеми

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

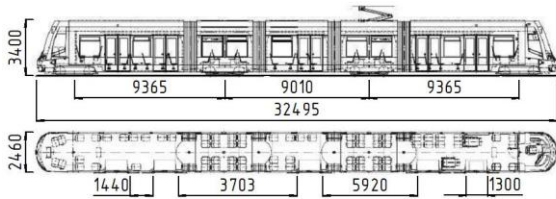


Рис. 5. П'ятисекційний ЗТВ моделі Skoda ForCity Plus, створений на основі комбінованої компоувальної схеми

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.

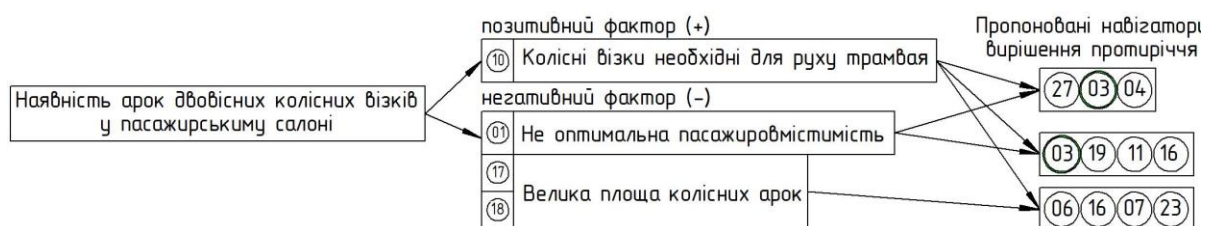


Рис. 6. Схема існуючого протиріччя у конструкціях ЗТВ і пропоновані навігатори для його усунення

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).

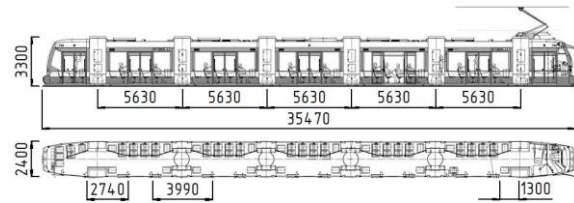


Рис. 7. Семисекційний ЗТВ моделі Siemens ULF, створений по оригінальній компоновальній схемі на основі одновісних колісних візків, якими обладнані передня і задня довгі секції та чотири шарнірно-з'єднувальні секції

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.

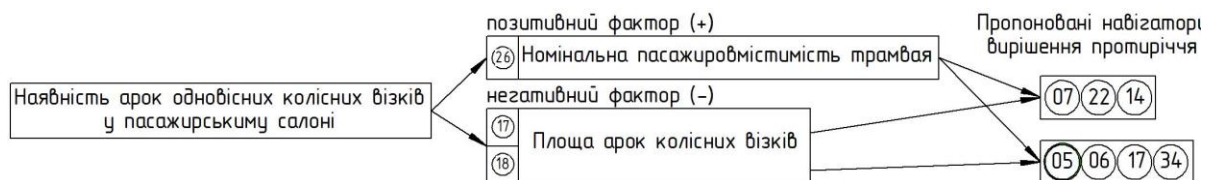


Рис. 8. Схема нового існуючого протиріччя у конструкціях ЗТВ і навігатори для його усунення

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:

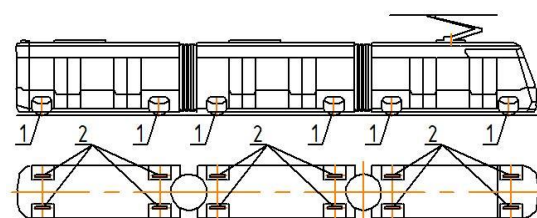


Рис. 9. Пропонована компоновальна схема для створення багатосекційних ЗТВ: 1 – одновісний колісний візок; 2 – колесо візка з індивідуальним тяговим двигуном

– 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).

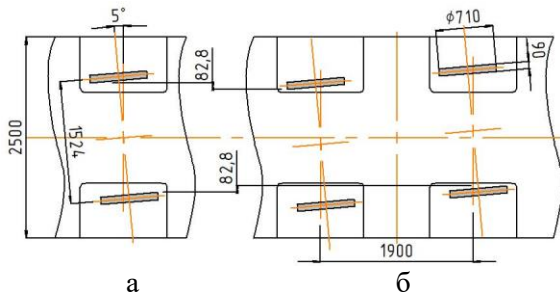


Рис. 10. Схема повороту колісних візків: а – одинарного; б – двовісного

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 пропонованої компоувальної схеми

Для оцінки доцільності створення багатосекційних ЗТВ на основі застосування пропонованої 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):

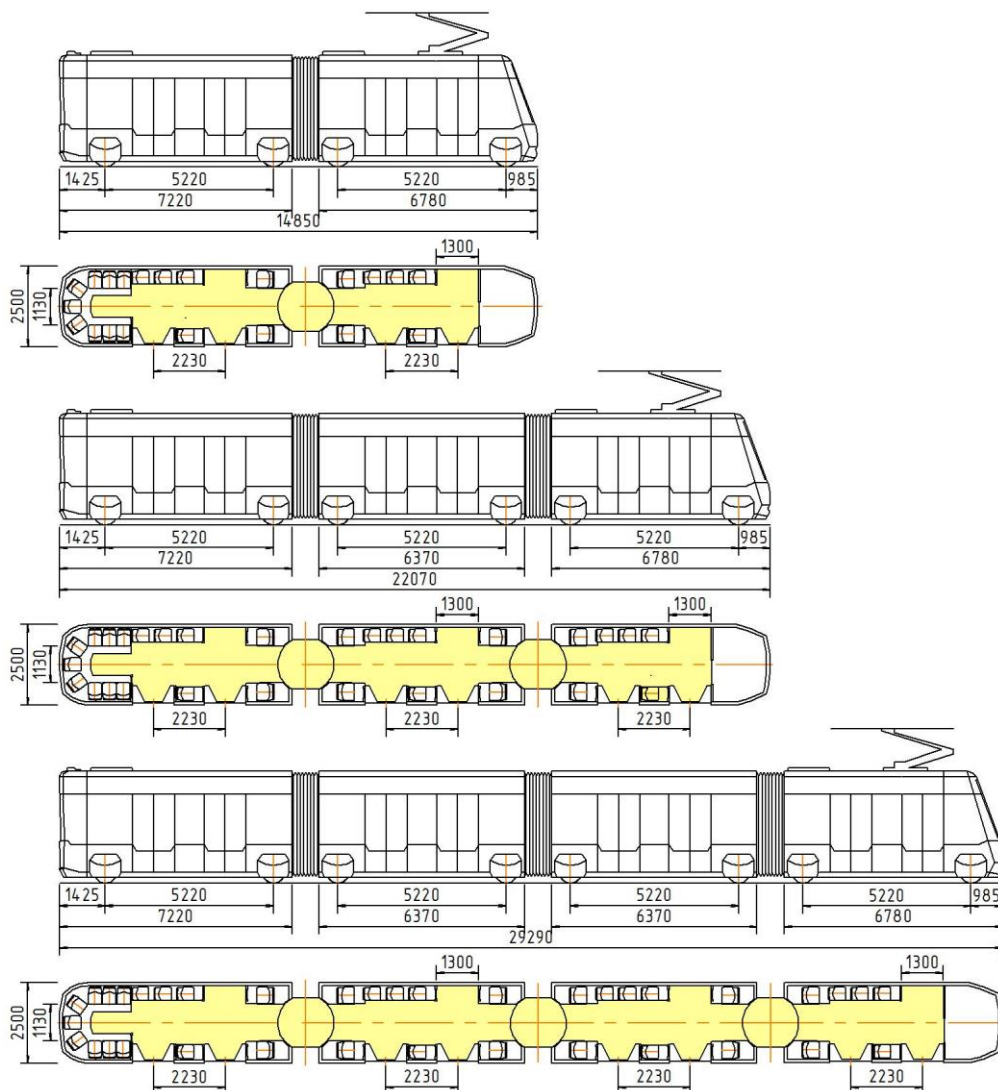


Рис. 11. Проєкт ТРР модульно-уніфікованих багатосекційних ЗТВ з одинарними візками

- тип трамвайних вагонів – однонаправлені з одним відділенням водія;
- кількість секцій у ЗТВ – дві, три та чотири;
- тип компоновальної 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).

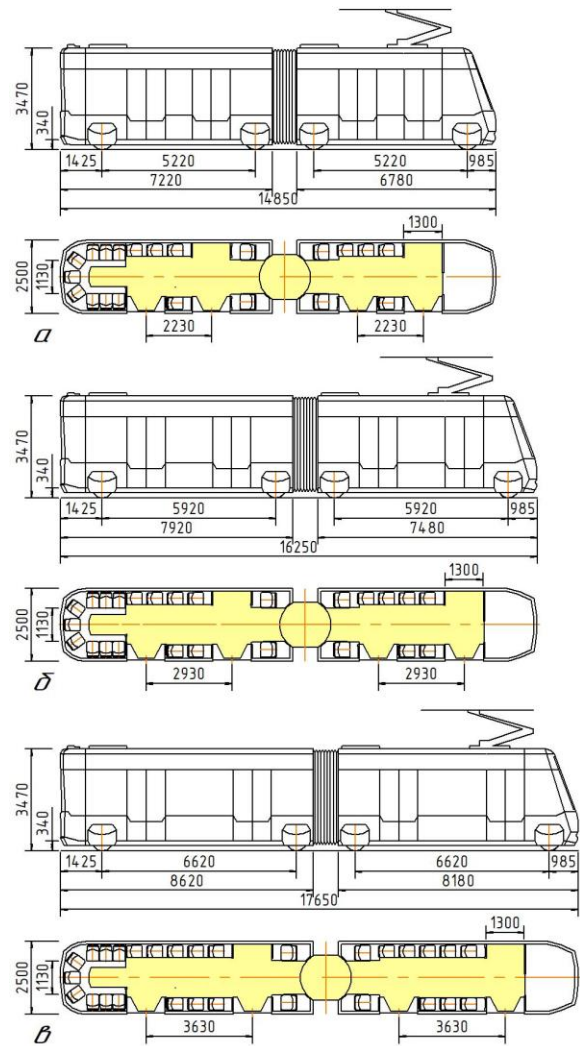


Рис. 12. Типорозмірний ряд двосекційних ЗТВ: а – проект АПП-сВ21; б – проект АПП-сВ22; в – проект АПП-сВ23

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 пропонує 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.

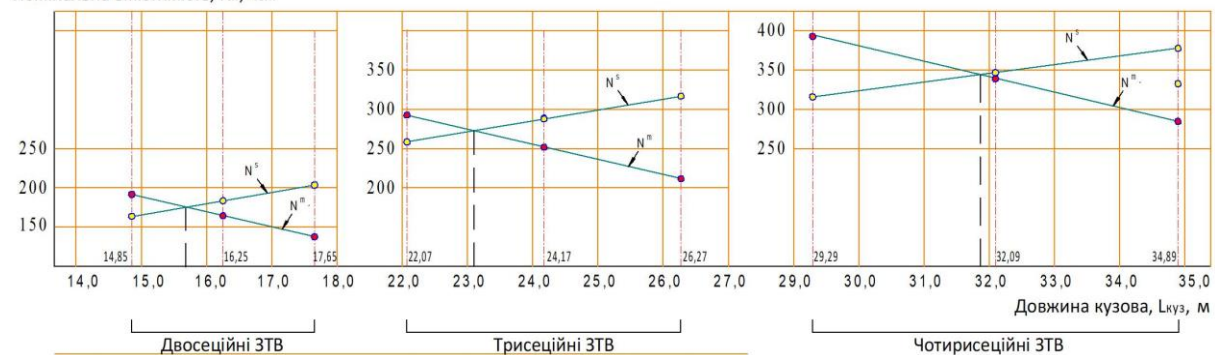


Рис. 13. Вплив довжини багатосекційних трамвайних вагонів на номінальну вмістимість

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 просямі, 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 просвіті, 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 просвіті, $\sum_{i=1}^n l_{\partial\sigma i}$, 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 пропонуваних ЗТВ (допустиме відхилення ±10 чол.);
- довжина кузова близька до пропонуваного 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 порівнюваних багатосекційних ЗТВ наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти експлуатаційної ефективності багатосекційних трамвайних вагонів

Позначка 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., Krzyzynski, 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/20120906SmatlakLRTCConferencePaper.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 Russian].
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.