

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Дмитро Янківський¹, Віталій Бризгалов², Антон Лягушкін³

¹Українська академія друкарства,

вул. Під Голоском, 19, м. Львів, e-mail: dmitrojankivskui@gmail.com

²Компанія ТзОВ «Murmuration Technology»,

вул. Мистецька, 2, м. Кривий Ріг, e-mail: murmuration.tech@gmail.com

³Інтернет-видання «Пасажирський транспорт»

вул. Дубова, 2, м. Львів, e-mail: polygrafant@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.106>

Янківський Д., Бризгалов В., Лягушкін А. Джерела живлення автономного електротранспорту та ефективність їх застосування

Автономний електричний транспорт (АЕТ), який повністю або частково незалежний від контактних мереж (КМ), останніми роками набуває все більшого поширення в розвинутих країнах світу. Це пов'язано з намаганням скоротити викиди вуглекислого газу та інших токсичних речовин, що продукуються двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) автомобільного транспорту. АЕТ потребує значно менших витрат на створення й утримання інфраструктури (контактні і кабельні мережі, тягові підстанції), аніж традиційний контактний електротранспорт. У містах із розвинутими мережами традиційного електротранспорту доцільним є застосування АЕТ для обслуговування напрямів, де відсутні великі пасажиропотоки, які окупили б будівництво контактних і кабельних мереж (ККМ) і тягових підстанцій (ТП), або наявні перешкоди для будівництва інфраструктури традиційного електротранспорту.

Джерела живлення АЕТ розміщені безпосередньо на транспортному засобі. Це тягові акумуляторні батареї (ТАБ), батареї суперконденсаторів (іоністорів) та паливні елементи для прямого перетворення енергії хімічної реакції на електричний струм разом із буферною акумуляторною батареєю. Частково автономний електротранспорт (дуобуси) може використовувати для живлення тягового електродвигуна (ТЕД) енергетичні установки на базі бензинового або дизельного ДВЗ і генератора струму. Окрема група автономного транспорту – це гіробуси, тобто транспортні засоби, які використовують механічні акумулятори енергії (маховики).

У разі застосування електробусів, які живляться від ТАБ чи батарей суперконденсаторів, АЕТ потребує створення інфраструктури – зарядних станцій, які можуть розміщуватися в депо для здійснення статичної (нічної) зарядки, а також на кінцевих зупинках маршрутів – зарядні станції для швидкої (динамічної) зарядки. Тролейбуси з автономним ходом (АХ) здійснюють зарядку ТАБ від контактної мережі (КМ).

Транспорт, що приводиться від паливних елементів (ПЕ), потребує спеціальних станцій для заправки ємностей стиснутим чи зрідженим воднем.

У статті здійснено огляд і аналіз основних технічних і конструктивних рішень енергетичних установок автономного електротранспорту, що реалізовані на серійних і дослідних моделях АЕТ, який експлуатується в Україні та за її межами, а також досвіду побудови електробуса на базі мікроавтобуса «Peugeot J9 Karsan». Виконано аналіз кожного типу джерел живлення АЕТ, розглянуто перспективи його подальшого використання, а також визначено доцільні межі використання.

Ключові слова: електротранспорт, електробус, троллейбус, дуобус, гіробус, акумулятор, іоністор, паливний елемент.

Yankivskiy D., Bryzhalov V., Liahushkin A. Power supply sources for autonomous electric vehicles and the effectiveness of their application

Autonomous Electric Vehicles (AEVs), which have been wholly or partially independent of catenary grids, have recently become increasingly widespread in developed countries. This is due to the effort to reduce emissions of carbon dioxide and other toxic substances, produced by internal combustion engines (ICEs) of road transport. AEVs require much less cost to build and maintain infrastructure (contact and cable networks, traction substations) than traditional contact electric vehicles. In the cities with developed traditional electric vehicles networks, it is advisable to use AEVs to service destinations, where there are no large passenger flows that would pay for the construction of contact and cable networks (CCNs) and traction substations (TSs), or there are obstacles for the establishment of traditional electric vehicle infrastructure.

AEV power supplies are located directly on the vehicle. These are traction batteries (TBs), supercapacitor (ionistor) batteries and fuel cells for direct conversion of chemical reaction energy into electric current together with a buffer battery.

Partially autonomous electric vehicles (duo buses) can use power installations, run on gasoline or diesel engine, and an electric generator to power the traction electric motor (TEM). A separate group of autonomous vehicles are gyros, i.e. vehicles that use mechanical energy accumulators (flywheels).

In the case of electric buses powered by TBs or supercapacitor batteries, the AEVs require creating of the infrastructure, i.e. charging stations that can be housed in depots for static (night) charging, and at final stops of routes – charging stations for fast (dynamic) charging. Autonomous trolleybuses charge the TBs from the catenary grid.

Fuel cell driven vehicles require special stations to fill with compressed or liquefied hydrogen.

The article reviews and analyzes the main technical and design solutions for autonomous electric vehicle installations, which are implemented on serial and experimental models of AEVs, operated in Ukraine and abroad, as well as the experience of building Peugeot J9 Karsan minibus. The work supplies analysis of each type of AEV power sources, and considers the prospects of their further use, as well as determines the appropriate limits of exploitation.

Key words: electric vehicle, electric bus, trolleybus, duo bus, gyro, battery, ionistor, fuel cell.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток міст тісно пов'язаний з виникненням електричного трамвая, який став справжньою транспортною системою і забезпечив містянам швидкі й достатньо комфортні перевезення. Пневматичні шини і досконалі ресори зумовили розвиток троллейбусного і автобусного транспорту. У мегаполісах з'явилися лінії метрополітену та приміські електрифіковані залізниці [5].

У 20-х рр. ХХ ст. з'являються масові недорогі моделі легкових авто, дешевшає паливо. Це спричинює призупинення розвитку і навіть закриття трамвайних і троллейбусних господарств – електротранспорт у 40–60-х роках замінюють автобуси, які не потребують капіталовкладень в інфраструктуру.

Водночас в останній чверті минулого століття в мегаполісах спостерігається перенасичення інфраструктури приватним автотранспортом і катастрофічне забруднення навколишнього середовища викидами транспортних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Зараз у містах автомобільний транспорт відіграє ключову роль у забрудненні атмосфери: у 2002 р. в м. Києві викиди шкідливих речовин від пересувних джерел (автотранспорт) становили 149,2 тис. т, а стаціонарних джерел – 31,6 тис. т [4]. Ці проблеми актуалізували розвиток міського електричного транспорту. Закон України «Про міський електричний транспорт» [13] передбачає пріоритетність електричного транспорту для міських територій із щільною забудовою, у рекреаційних зонах, а також у разі значного забруднення навколишнього середовища.

Електротранспорт із живленням від контактних мереж (КМ) потребує значних інвестицій в інфраструктуру та її утримання. Будівництво 1 кілометра трамвайної колії в Україні вартує близько 5 млн євро [14; 17], а 1 кілометра КМ троллейбуса близько 470 тис. євро [3]. Традиційний електротранспорт є економічно ефективним за умови значних пасажиропотоків. Це 3,5 – 6,7 тис.

пасажирів у годину «пік» для троллейбуса і 6,0 – 12,0 тис. пасажирів для трамвая [6].

Повністю та частково автономний електричний транспорт (АЕТ) (електробуси, троллейбуси з автономним ходом (АХ) та ін.) може експлуатуватися на напрямках із невеликим пасажиропотоком. Оснащення маршрутів зарядними пристроями, як правило, дешевше за влаштування КМ. Особливо актуальним є впровадження троллейбусів з АХ, адже вони заряджають тягові акумуляторні батареї (ТАБ) чи батареї суперконденсаторів від існуючої КМ.

АХ на частині маршруту може застосовуватися через перешкоди, які унеможливають будівництво КМ, наприклад, перетин троллейбусних ліній з електрифікованим залізницями не допускається ДБН В.2.3-18:2007 [7].

Отож, створення в Україні власного виробництва електроприводів для АЕТ є дуже актуальним завданням, оскільки великі міста Європи поступово відмовляються від використання громадського транспорту з ДВЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міський електричний транспорт за способом отримання живлення і залежністю від КМ поділяють на: контактний (трамвай, троллейбус, поїзди метрополітену), безконтактний (електробуси, автобуси з живленням від паливних елементів), а також комбінований («частковий») – тобто такий, який може отримувати енергію від КМ і від бортових джерел [1]. Останні два види електротранспорту називають автономним електротранспортом (АЕТ).

Перші електромобілі з'явилися практично одночасно з винайденням трамвая і троллейбуса. Зокрема, перший електромобіль у Чехії був збудований Ф. Кржижиком ще 1895 р., але через велику масу акумуляторних батарей та їх малу ємність електромобілі не знайшли широкого застосування.

Починаючи з 40-х рр. XX ст. розпочалося виробництво дуобусів, які живилися від КМ на найбільш завантажених ділянках траси і на крутих підйомах, а там, де немає КМ, приводилися від ТАБ або ДВЗ [2]. Дуобус був побудований у Москві на автозаводі ім. Сталіна (нині – імені Ліхачова) [8]. Це був тролейбус ЗіС-154, оснащений ДВЗ, що приводив у дію генератор для живлення привідного електродвигуна на ділянках без КМ. Через значно більшу складність, ніж окремо тролейбус і окремо автобус, у серію машину не було запущено.

В Європі у 60–70-ті рр. минулого століття, було побудовано дуобуси, які мали незалежні між собою електричний привід, який живився від КМ та ДВЗ, від якого транспорт приводився на ділянках без КМ [1; 2]. Компанія «Graft und Stift» (Австрія) побудувала зічленований тривісний дуобус, одна вісь якого приводилася тяговим електродвигуном (ТЕД) постійного струму потужністю 165 кВт, а інша – через традиційну трансмісію (треступенева коробка і гідротрансформатор) від дизельного ДВЗ потужністю 177 кВт. Цей дуобус виявився дуже трудомістким в обслуговуванні і в серію не був запущений. У Німеччині в 1975 р. збудовано дуобус ОЕ305, в якому ТЕД і дизельний ДВЗ приводили ведучі колеса через одну і ту саму автоматичну коробку передач [2].

З 1976 р. Київський завод електротранспорту (КЗЕТ) виготовляв вантажні тролейбуси КТГ [16], які теж є дуобусами. Вони мають два незалежних двигуни – бензиновий ДВЗ (6-циліндровий карбюраторний ЗІЛ-157 потужністю 110 кВт при 2800 об./хв) із механічною коробкою передач та ТЕД (ДК-207ГЗ, 110 кВт), які пов'язані між собою трансмісією. Виготовлено близько 700 тролейбусів КТГ різних модифікацій, які використовувалися для доставки вантажів і транспортування несправних тролейбусів. Виробництво припинене у 1993 р. через технічну застарілість використаних конструкторських рішень.

Більш досконалі дуобуси і тролейбуси з АХ побудовані у 80-90-тих рр. XX ст. У них ДВЗ, генератор і електрична система управління ТЕД поєднані в єдину систему [1; 2]. АХ у такого транспорту може мати аварійний характер, тоді потужність дизель-генераторної установки (ДГУ) не перевищує 30 % від потужності ТЕД, а може використовуватися й для перевезення пасажирів – тоді потужність ДГУ становить не менше ніж 50 – 70 % потужності ТЕД [10].

Із підвищенням екологічних вимог до транспорту та удосконаленням ТАБ стало економічніше

застосовувати пристрої АХ від ТАБ сучасних типів [12].

Один із перших «тролейних електробусів» виготовлений у 1944 р. Він мав АХ на 15 – 20 кілометрів від потужних ТАБ, що заряджалися під час руху і стоянки від КМ [8]. Він успішно пропрацював 12 років без заміни обладнання. Проте через велику масу та об'єм акумуляторної батареї (АКБ) такі машини так і не були запущені в серійне виробництво.

У 1975 р. в Німеччині за участю компаній «MAN», «Bosch», «Varta», «Siemens» та «Voith» був побудований прототип тролейбуса з АХ моделі ОЕ302 [1; 2]. Заряд ТАБ фірми «Varta» становив 120 кВт·год, вона мала водне охолодження. Цей тролейбус був економічнішим, ніж контактні тролейбуси – за рахунок рекуперативного гальмування використовувалося 15 – 19 % енергії гальмування, а енергоспоживання на 1 кілометр пробігу становило 70 – 85 Вт·год на тонну маси тролейбуса. Запуску в серію перешкодили велика маса, висока вартість і складність машини.

Зараз одним зі світових лідерів з виготовлення тролейбусів з АХ та електробусів із живленням від АКБ є чеська компанія «Skoda» [21]. Також електрообладнання для тролейбусів з АХ виготовляють компанії «Medcom» (Польща), «Kiere Electronik» (Німеччина), «Інформбізнес» (Молдова) та ін.

Замість ТАБ у тролейбусах з АХ використовують також батареї суперконденсаторів (іоністорів). Їх використовує, зокрема, білоруський завод «Белкомунмаш» [19].

Постійне вдосконалення виробництва акумуляторів забезпечило серійне виробництво відносно недорогих ТАБ великої питомої ємності на одиницю маси та об'єму, тому на початку 2000-х років з'явилися серійні електробуси для міських і приміських перевезень. Лідером у цій галузі є китайська компанія «BYD». У Східній Європі електробуси спільно виготовляють фірми «Skoda» (електрообладнання) і «Solaris» (кузови). Електробуси-прототипи виготовлені в Україні ТзОВ «СНУП «Електронтранс» (Львів) та АТ «АК «Богдан Моторс» (Луцьк).

Паливні елементи, що безпосередньо перетворюють енергію хімічної реакції на електричну, на транспорті можуть застосовуватися тільки паралельно з буферною акумуляторною батареєю [12]. Уже розроблено «водневий» автобус «Solaris Urbino Hidrogen» [23], а компанія «Skoda» на замовлення Риги виготовила тролейбус, АХ якого забезпечується паливними елементами, але широкого розповсюдження такий транспорт поки що не має.

У 50-60-х рр. ХХ ст. був розроблений АЕТ із механічним акумулятором енергії (маховиком великого розміру) – так званий гіробус [20]. Зараз такий транспорт не використовується, хоча дослідники й далі розглядають маховики як перспективний накопичувач енергії.

Постановка завдання. Метою дослідження є огляд і аналіз конструкції та джерел живлення автономного електротранспорту (насамперед – тролейбусів з АХ), який експлуатується в Україні та сусідніх державах. На основі цього визначено доцільні межі й ефективність застосування цих джерел живлення під час конструювання серійних транспортних засобів міського електричного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Основні методи дослідження. Автономний електротранспорт із комбінованим приводом із ДВЗ в Україні представлений серійними тролейбусами іноземного виробництва і модернізованим тролейбусом ЮМЗ Т2 [15] Південного машинобудівного заводу імені Макарова. Модернізація проведена КП «Міський тролейбус» (Кривий Ріг) за участю компанії «Ді Елком Україна» [10].

Відомості про серійні тролейбуси із АХ від ДГУ, які експлуатуються в Україні, згруповано в табл. 1.

У серійних тролейбусах, які експлуатують в Україні, де потужність ДГУ становить близько 20 – 30 % потужності ТЕД, пристрій АХ використовують як аварійний, тобто на АХ тролейбус рухається тільки без пасажирів.

Із пасажирами в Кривому Розі на АХ від ДГУ експлуатується модернізований тролейбус ЮМЗ Т2. На тролейбус, обладнаний двигуном постійного струму ЕД139АУ2 потужністю 130 кВт [15], під час модернізації встановлено ДВЗ PERKINS 1104С-44TAG2 та генератор, який на виході видає потужність 88 кВт. ДГУ має значні габарити – 1980×890×1317 мм і масу 1132 кг, тому несуча конструкція тролейбуса потребує підсилення. Об'єм паливного бака – 218 л [10].

Отож, для повноцінної роботи на маршрутах із пасажирами потужність ДГУ має становити близько 2/3 потужності ТЕД, але зі зростанням потужності ДГУ відповідно зростають і її об'єм та маса, що, відповідно, зменшує пасажиромісткість тролейбуса стандартних розмірів.

Таблиця 1. Деякі технічні характеристики тролейбусів із автономним ходом від дизель-генераторної установки, що експлуатуються в Україні

Table 1. Some technical characteristics of self-propelled trolley buses operating in Ukraine

Модель тролейбуса, місто експлуатації	Довжина кузова, м	Маса тролейбуса: споряджена і повна, кг	Потужність тягового електро-двигуна, кВт, тип	Потужність дизельного двигуна, кВт	Потужність генератора, кВт
MAN SL 172 HO, тривісний, Маріуполь	12,0	12000/20000	155 постійного струму	30	27,3
Skoda 21Tr ACI, двовісний, Чернівці	11,560	12000/18000	156 асинхронний	40	40
БКМ 321, двовісний, Одеса	11,935	11750/18000	150 асинхронний	30	
Hess BGT-N2, тривісний зічленований, Чернівці	17,913	17500/28000	155 асинхронний	50	45
ЮМЗ Т2 модернізований, двовісний, Кривий Ріг	11,640	13132/17000	130 постійного струму	88	

Усі сучасні тролейбуси проектуються низькопідлоговими, тому ДГУ розміщують у задній частині тролейбуса. Використання навіть малопотужної ДГУ забирає значну частину корисної площі салону і зменшує кількість місць для сидіння. Для прикладу, тролейбуси БКМ 321 для Одеси з ДГУ мають на 5 сидінь менше, ніж такі ж тролейбуси без ДГУ. Наявність ДГУ підвищує пожежну небезпеку тролейбуса і потребує його оснащення автоматичною системою пожежогасіння та спричинює зростання трудомісткості технічного обслуговування. Окрім того, за строком служби ДВЗ значно поступаються ТЕД. Тому тролейбуси з АХ від ДГУ уже не відповідають сучасним вимогам.

Автономний транспорт із живленням від акумуляторних батарей можна поділити на дві групи: повністю автономний – це так звані «електробуси із статичною зарядкою», ТАБ яких заряджають уночі в депо і вони впродовж усього дня працюють на маршруті без підзарядки, і частково автономний – електробуси з динамічною зарядкою на лінії та тролейбуси з АХ.

Повністю автономний електротранспорт має дві переваги: він не потребує зарядної інфраструктури на маршрутах, а для зарядки використовує дешевшу «нічну» електроенергію. Його недолік – значна маса, об'єм і вартість ТАБ, які забезпечують йому великий пробіг.

Частково автономний електротранспорт потребує зарядної інфраструктури у вигляді або «швидких» зарядних станцій на кінцевих зупинках, або традиційної КМ. Для цього електробуси оснащують струмоприймачами. Для зарядки ТАБ можна використовувати час на відпочинок і харчування водіїв, передбачений трудовим законодавством.

Будівництвом електробусів і тролейбусів з АХ займається велика кількість виробників. Це, зокрема, китайські «BYD» та «Youtong», чеські

«Skoda» та «SOR», польські «Solaris» та «Ursus Bus», білоруський «Белкомунмаш» та українські ТЗОВ «СНУП «Електронтранс», АТ «АК «Богдан Моторс» і ТЗОВ «Торговий дім «Літан».

Чеська компанія «Skoda Electric» виготовляє електробуси зі статичною (нічною) і динамічною зарядкою від зарядної станції чи від КМ тролейбуса під час руху [21]. Електробуси «Skoda PERUN HE (High Energy)» мають 12 метрів довжини, перевозять до 82 пасажирів (27 місць для сидіння). Живлення забезпечують літій-іонні ТАБ потужністю 160 кВт·год, які забезпечують пробіг заповненого електробуса 150–200 км без підзарядки. Повна зарядка ТАБ від електромережі потребує до 5 годин, при використанні спеціальної зарядної станції – близько 70 хв. 12-метрові електробуси «Skoda PERUN HP (High Power)» заряджають свої ТАБ за 5–8 хв на зарядних станціях «Skoda Ultra Ultra Charger». Пробіг від однієї зарядки – до 35 км. Такі електробуси вміщують до 85 пасажирів, у салоні – 27 сидінь.

Польська компанія «Solaris» розробила типажний ряд електробусів «Urbino electric», які мають довжину 8, 9, 12 і 18 (зічленовані) метрів [22].

Електробуси-прототипи в Україні створено у 2014–2016 рр. Їх виготовили компанії ТЗОВ «СНУП «Електронтранс» та АТ «АК «Богдан Моторс». Ці транспортні засоби експлуатуються у Львові та польському Любліні. Технічні характеристики українських електробусів подані в табл. 2.

Вартість ТАБ повністю автономного електротранспорту на сьогодні становить близько 40 % від вартості транспортного засобу. Якщо порівнювати вартість вітчизняного тролейбуса і електробуса, то електробус «Електрон» вартує приблизно вдвічі більше, ніж серійний український тролейбус.

Таблиця 2. Деякі технічні характеристики електробусів вітчизняного виробництва

Table 2. Some technical characteristics of domestic production electric buses

Модель електробуса	Компанія-виробник електрообладнання	Довжина, м	Маса, т	Потужність ТЕД, кВт	Повна пасажиромісткість, осіб	Ємність ТАБ, кВт·год, та їх тип	Величина АХ, км
Електрон E191	«Enika», Польща	12,0	13,7	2×125, асинхронні	100	225, літій-ферум-фосфат	210
Богдан A70100	«Enika», Польща	11,96	14,0	235 синхронний, від постійних магнітів	80	240 літій-іон	250

Досвід трирічної експлуатації електробуса «Електрон» Е191 на маршрутах ЛКП «Львів-електротранс» показав, що наявної ємності ТАБ не достатньо для повноцінної двозмінної роботи з пасажирями. Це пов'язано з особливостями експлуатації електробуса в міському режимі з частими зупинками для посадки-висадки пасажирів і на перехрестях. Тому виробник планує дооснастити серійні електробуси струмознімачами для зарядки від зарядних станцій чи контактної мережі.

Електробус на базі мікроавтобуса «Peugeot J9 Karsan» розроблений українською компанією «Murmuration Technology» з Кривого Рогу для перевірки можливості переобладнання серійних автобусів та мікроавтобусів у АЕТ, а також для вивчення проблем, пов'язаних із таким переобладнанням. Метою проекту також була перевірка розрахункової вартості утримання й витрат на експлуатацію. Команда розробників своїми силами виготовила весь електропривод електробуса, включно з тяговим інвертором і привідним електродвигуном.

Кузов і ходову частину мікроавтобуса «Peugeot J9 Karsan» було відновлено після багаторічної роботи на маршрутах міста Кривого Рогу і повного вичерпання ресурсу ДВЗ. Конверсія мікроавтобуса в електричний дозволяє продовжити термін його експлуатації мінімально на 5 років. Як привідний двигун у мікроелектробусі на базі «Peugeot J9 Karsan» використано синхронний ТЕД типу вентильний реактивний. Його номінальна потужність – 60 кВт, крутний момент 300 Нм у діапазоні 0 – 2500 об./хв. Особливістю ТЕД є те, що він має чотири незалежні обмотки фаз, тому може продовжити свою роботу в разі виходу з ладу однієї чи двох обмоток, чи силових блоків інвертора. ТЕД здатний витримувати перевантаження у 2 рази.

У конструкції мініелектробуса застосовані літій-іонні тягові акумулятори типу «літій-нікель-алюміній». Ємність ТАБ становить 80 кВт-год, чого вистачає на 250 км АХ при русі на міському маршруті з повним завантаженням салону (11 – 14 пасажирів) від однієї зарядки ТАБ. Маса ТАБ становить 400 кг.

Експеримент із побудовою електробуса на базі «Peugeot J9 Karsan» довів можливість розробки й побудови в Україні сучасних систем тягових електроприводів для електробусів і організації практично повного циклу їх виробництва, але показав, що переобладнання кузовів старих автобусів, особливо малого класу, в електробуси є не надто доцільним, насамперед через те, що в

серійному кузові практично неможливо правильно розташувати важкі ТАБ, а також інші елементи приводу.

Розробники вважають більш доцільною адаптацію кузовів серійних автобусів іще на етапі проектування електротранспорту, що забезпечить гнучкість у розташуванні силових агрегатів і дозволить втілити найсміливіші ідеї інженерів-розробників: 100 % низькопідлоговість, наднизький центр ваги, який забезпечує високу стійкість автомобіля, встановлення електронних систем керування і курсової стійкості тощо.

У тролейбусів з АХ від ТАБ ємність акумуляторів значно менша, аніж у електробусів зі статичною зарядкою. Компанія «Skoda Electric» для 12-метрових тролейбусів використовує ТАБ ємністю близько 55 кВт-год при потужності асинхронного ТЕД в 160 кВт [21]. Фірмою «HESS» (Швейцарія) виготовлено зічленований тролейбус «SwissTrolley lightTram 19 DC» із ТЕД потужністю 240 кВт, із ТАБ ємністю 64,3 кВт-год. Ємність ТАБ здебільшого вибирає замовник залежно місцевих умов.

В Україні виробництво тролейбусів з АХ від ТАБ налагоджене у 2017 р. на Південному машинобудівному заводі ім. Макарова у співпраці з компанією ТзОВ «Торговий дім «Літан». Тролейбуси із АХ «Дніпро» Т203 виготовляють на базі кузовів МАЗ 203 і електрообладнання компанії «Інформбізнес» (Молдова). Літій-іонна ТАБ складається зі 160 елементів і має масу 576 кг. Повний заряд ТАБ від контактної мережі триває 40 хв і відбувається під час руху й стоянки тролейбуса. Відомості про тролейбус «Дніпро» Т203 внесено в табл. 3.

Також тролейбуси з автономним ходом в Україні виготовляє АТ «АК «Богдан Моторс» на базі моделей Т701.17 і Т901.17. Виробник електрообладнання – ТзОВ «Політехносервіс» (Київ). Глибоку модернізацію тролейбуса «Skoda 21Tr» з впровадженням АХ від ТАБ проведено силами КП «Одесміськелектротранс», заявлений АХ цього тролейбуса – 40 км. На базі кузова МАЗ 203 і електрообладнання компанії «Політехносервіс» тролейбус із АХ від ТАБ побудовано «Вінницькою транспортною компанією».

При конструюванні АЕТ враховують, що довговічність ТАБ (кількість циклів заряду-розряду) залежить від глибини розряду (DOD – Depth of Discharge). Глибина розряду показує, яку кількість енергії ТАБ може віддати без зростання температури.

Таблиця 3. Деякі технічні характеристики тролейбуса з автономним ходом вітчизняного виробництва**Table 3.** Some technical characteristics of a trolleybus with autonomous course of domestic production

Модель електробуса	Довжина, м	Маса, т	Потужність ТЕД, кВт	Повна пасажиромісткість, осіб	Ємність ТАБ, кВт·год, та їх тип	Величина АХ, км
Дніпро Т203	12,2	11,8	180, асинхронний	90	до 100, літій-іонні	20 і більше

Для прикладу, під час дослідної експлуатації легкового електромобіля «Tesla Model S» встановлено, що за використання практично повного заряду ТАБ її ресурс становив 300 – 500 циклів заряду-розряду, а пробіг – лише 92 тис. км. У разі використання близько 50 % ємності ТАБ кількість циклів збільшилася до 1200 – 1500, а пробіг – до 585 тис. км. Крім того, швидкість зношення більшості типів акумуляторних батарей залежить від величини струму розрядження та заряджання. Саме тому виробник тролейбуса із АХ «Дніпро» Т203 використав ТАБ значної ємності (100 кВт·год) при заявленій величині АХ у 20 км. Тому глибина розряду не перевищує 40 – 45 %, що забезпечує довговічність ТАБ.

Як джерела живлення АЕТ можуть використовуватися не тільки згадані вже літій-іонні ТАБ, а й акумуляторні батареї інших типів [11; 12; 18]. Отож, коротко розглянемо всі типи ТАБ, які можуть використовуватися як джерела живлення АЕТ.

Свинцево-кислотні акумулятори (СКА) були використані в перших моделях автономного електротранспорту. Із серійного транспорту від СКА живляться рудникові електровози й електрокари. Сучасні СКА («гелеві») не потребують обслуговування. Найбільший ресурс (до 1000 – 1500 циклів заряду-розряду) мають так звані «поверхневі СКА», де на поверхні пластин електрохімічним способом отримується губчастий свинець – оксид свинцю PbO₂. Інші типи СКА мають ресурс 150 – 500 циклів. Номінальна напруга одного елемента СКА – близько 2,0 В, питома енергоємність (заряд) – 20–40 Вт·год на кілограм маси або 80 Вт·год/л, питома потужність – до 180 Вт/кг. Вартість СКА – близько 150 дол. США на 1 кВт·год ємності. Для забезпечення довговічності глибина розряду СКА не повинна перевищувати 50 %. Основний недолік СКА – значний час заряду (понад 8 годин) та мала кількість заряду-розряду. СКА можуть застосовуватися на тролейбусах із АХ в ролі резервного джерела живлення для аварійного пересування.

Нікель-кадмієві акумулятори (НКА) ґрунтуються на оборотній реакції між металевим кадмієм і сполукою нікелю NiOOH. Герметичні НКА мають номінальну напругу елемента 1,2 В з внутрішнім опором 0,1 – 0,2 Ом, питому енергоємність 40 – 55 Вт·год/кг і 70 – 120 Вт·год/л і питому потужність у 150 Вт/кг. Час заряду – близько 8 год. НКА витримують до 2000 циклів повного заряду/розряду. Робочий діапазон температур – від -40 °С до +70 °С. Глибина розряду не повинна перевищувати 50 – 80 %. Негативним чинником є токсичність кадмію. Використання НКА у транспорті стримує висока ціна – 400 – 800 дол. США за 1 кВт·год заряду [12; 11].

Нікель-метало-гідридні (NiMH) акумулятори (НМГА) за більшістю характеристик перевершують НКА і дешевші за них. Номінальна напруга елемента НМГА становить 1,2 – 1,25 В, внутрішній опір – 0,15 – 0,25 Ом; питома енергоємність – 30 – 80 Вт·год/кг і 250 – 300 Вт·год/л; питома потужність 250 – 1000 Вт/кг, час заряду – близько 6 год, проте розроблено алгоритми швидшого заряду, протягом 1–4 год НМГА витримують до 500 – 1000 циклів повного розряду/заряду. Робочі температури – від -20 °С до +50 °С. Рекомендована глибина розряду – у межах 50 – 85 %. Вартість у розрахунку на 1 кВт·год заряду становить близько 200 – 250 дол. США. Експлуатація ТАБ на основі НМГА потребує їх охолодження [12; 11].

НМГА використовувалися у конструкції низки легкових електромобілів і гібридних автомобілів, які було розроблено у 2000-х роках, наприклад «Prius», «Toyota Highlander», «Lexus GS 450h» та ін.

Слід зазначити, що НКА та НМГА характеризуються так званим «ефектом пам'яті», тобто оборотною втратою ємності в разі порушення рекомендованого алгоритму заряду. Для усунення цього явища необхідні спеціальні алгоритми розряду-заряду цих типів акумуляторів [11].

Літій-іонні акумулятори (ЛІА). Перші теоретичні дослідження, які довели можливість створення потужних акумуляторів на основі літію,

з'явилися у 70-х рр. XX ст. Промисловий випуск ЛІА розпочався у 1991 р. компанією «Sony». Робота ЛІА базується на русі іонів літію від від'ємно зарядженого анода (виготовляється із LiC_6 або $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) до катода з додатним зарядом (виготовляється з LiMn_2O_4 , LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiFePO_4) [9; 11].

Сучасні ЛІА мають номінальну напругу елемента 3,5 – 3,8 В; внутрішній опір 0,15 – 0,25 Ом; питому енергоємність 100 – 190 Вт·год/кг і до 250 Вт·год/л; питому потужність до 1800 Вт/кг. Тривалість заряду для більшості ЛІА – близько 2 год, а кількість циклів заряду-розряду – до 2000. Рекомендована глибина розряду – не більше ніж 80 %. ЛІА не мають «ефекту пам'яті», тому не потребують складних алгоритмів зарядки. Середня вартість ЛІА зараз становить 120 – 180 дол. США за 1 кВт·год з перспективою падіння до 90 дол. США за 1 кВт·год.

Найперспективнішими є літєві акумулятори на базі модифікованого нано-титанату літію (Li_2TiO_3), які можуть витримувати до 8000 циклів заряду/розряду, проте мають високу вартість. Завдяки відносно низькій вартості і безпеці також перспективними є акумулятори на базі LiFePO_4 , які забезпечують значні робочі струми. Нижній поріг робочих температур літєвих акумуляторів становить від -30 – -15 °С до $+50$ – $+60$ °С. Розроблені також так звані «літій-полімерні» акумулятори (Li-pol, ЛПА), які характерні тим, що як електроліт використовується полімерний матеріал із включенням желеподібного літій-провідного наповнювача. Питома потужність ЛПА на 20 % більша, ніж у звичайних ЛІА, але більшість ЛПА не здатна видавати значні струми.

Короткий огляд різних типів ТАБ для живлення АЕТ показує, що на сьогодні саме вибір ЛІА різних типів є оптимальним, оскільки завдяки високій напрузі елемента можна зменшити їх кількість у ТАБ, крім того, висока питома енергоємність забезпечує мінімальну масу та об'єм літій-іонних ТАБ порівняно з іншими типами акумуляторів. Екологічна безпека ЛПА забезпечується їх герметичністю, хоча вони залишаються пожежо-небезпечними в разі порушення рекомендованих режимів роботи.

Через те що сучасні ЛІА практично не потребують обслуговування, вони можуть встановлюватися на даху низькопідлогових транспортних засобів, але при цьому потрібно перевірити стійкість транспортного засобу на поворотах – розрахунком має бути встановлено розташування центра ваги транспортного засобу і максимальну швидкість під час проходження поворотів малого радіуса.

Для оцінки необхідної ємності E ТАБ, кВт·год, залежно від величини A_X можна скористатися такою формулою:

$$E = \frac{S \cdot e_{num} \cdot M \cdot K_d}{\eta_a \cdot \eta_{np} \cdot DOD}; \quad (1)$$

де S – величина A_X , км; e_{num} – питома електроспоживання електробуса чи тролейбуса, кВт·год/(км·год). За експериментальними даними $e_{num} = 0,07 - 0,085$ кВт·год/(км·год) [1; 8]; M – максимальна маса транспортного засобу з пасажирами; K_d – коефіцієнт, який враховує витрату енергії на опалення чи кондиціонування салону й кабіни тощо; η_a , η_{np} – коефіцієнти корисної дії акумуляторів і приводу; DOD – допустима глибина розряду для обраного типу ТАБ.

Масу M_a та об'єм V_a ТАБ наближено можна оцінити так:

$$M_a = \frac{E}{e_{mnum}}; \quad V_a = \frac{E}{e_{vnum}}, \quad (2)$$

де e_{mnum} , e_{vnum} – питомі енергоємності акумуляторів з розрахунку на один кілограм маси чи літр об'єму.

Конструювання і дослідна експлуатація електробуса на базі «Peugeot J9 Karsan» показала, що ТАБ для електробусів потрібно вибирати насамперед не за новизною і великою густиною енергії на одиницю маси, а за терміном служби, безпекою, стійкістю до перевантажень та кліматичних умов експлуатації. Ці умови найбільш задовольняють літій-залізо-фосфатні ТАБ, які вже давно наявні на ринку і мають відносно невисоку ціну.

Автономний транспорт із живленням від батарей суперконденсаторів (іоністорів). Основним недоліком ТАБ, які використовуються для живлення АЕТ, є їх порівняно невисока довговічність. Здебільшого довговічність ТАБ значно менша, ніж у кузова і електропривода тролейбуса чи електробуса. Тому конструктори шукають альтернативні джерела енергії для АЕТ.

Одним із таких джерел є суперконденсатори (іоністори), в яких енергія накопичується у вигляді статичного заряду. Іоністор – двошаровий електрохімічний конденсатор, займає проміжне місце між конденсаторами і хімічними джерелами струму, обкладками якого є подвійний електричний шар на межі розподілу електрода та електроліту. Іоністори повністю безпечні у використанні та не потребують догляду, їх зарядка відбувається дуже швидко.

Сучасні іоністори, які використовуються як накопичувачі електричної енергії в АЕТ, значно

відстають від усіх типів ТАБ за своїми показниками енергоємності на одиницю маси та об'єму – переважно 5 – 30 Вт·год/кг і 1 – 1,5 Вт·год/л, проте значно перевищують їх за питомою потужністю – 4 – 5 кВт/кг. Водночас сучасні іоністори можуть без втрати ємності витримувати понад 500 тис. циклів заряду-розряду, тобто ресурсу іоністорів вистачить на 50 років роботи електробуса, що перевищує ресурс його ТЕД та кузова.

Типажний ряд електробусів із живленням від батарей іоністорів розроблений компанією «Белкомунмаш» і включає моделі довжиною 9 м (Е490), 12 м (Е420 та Е321) і 18 м (Е433). У Мінську електробуси Е433 «Vitovt Max Electro» з травня 2017 р. працюють із пасажирами на маршрутах. Зарядка батарей іоністорів відбувається за допомогою струмознімачів на даху електробуса на трьох зарядних станціях, які розташовані на кінцевих точках маршруту. Зарядка триває 5 – 8 хв, максимальна величина струму заряджання – 500 А. Заявлена виробником величина АХ – до 40 км (для моделі Е321).

Зауважимо, що, на відміну від ТАБ, у яких напруга падає лише незначно залежно від глибини розряду, у іоністорів при постійному струмі розрядки вона падає практично за лінійним законом, що потребує застосування відповідного алгоритму в системі керування тяговим електроприводом.

Автономний транспорт із живленням від паливних елементів ТАБ та іоністори, які зараз використовуються АЕТ як джерела живлення, в основному не можуть конкурувати з ДВЗ за енергоємністю. Пробіг електробусів із ТАБ обмежується 300 – 350 км, електробусів з іоністорами – до 40 км. Паливні елементи – це той вид джерела енергії для АЕТ, який може забезпечити йому пробіг від однієї заправки воднем на рівні з ДВЗ [12]. У вигляді палива у них використовують водень або метанол.

На сьогодні найперспективнішими типами паливних елементів (ПЕ) вважають: паливні елементи з лужним електролітом, як правило, розчином КОН (ПЕЛЕ); паливні елементи з протонно-обмінними мембранами (ПЕПОМ) з електролітом у вигляді полімеру; паливні елементи з твердооксидними електролітами (ПЕТОЕ) та прямі метанолові паливні елементи (ПМПЕ), де електроліт перебуває у вигляді полімеру чи рідкої кислоти.

Залежно від типу ПЕ, їх ККД є в межах від 30 – 40 % до 45 – 50 %, що значно перевищує ККД теплової генерації на електростанціях.

Для використання на транспорті найбільш придатні ПЕЛЕ, ПЕПОМ та ПМПЕ, адже діапазон

їх робочих температур становить 50 – 200 °С. Найбільш енергоефективними є ПЕПОМ, які на 1 м² площі реакції дають потужність 3,5 – 6 кВт. Енергоефективність ПМПЕ становить 1,5 – 3,2 кВт/м², а ПЕЛЕ – 2 – 3 кВт/м². Вартість ПЕ трьох типів, окрім ПЕТОЕ, становить близько 200 дол. США в розрахунку на 1 кВт, а у ПЕТОЕ – близько 1500 дол. на 1 кВт. Щодо терміну служби, то у ПЕЛЕ та ПМПЕ він становить до 10 тис. год, у двох інших типів – до 40 тис. год.

Недоліком усіх типів ПЕ є те, що вони при сталій швидкості хімічної реакції продукують сталій за величиною струм. Тому для гасіння пікових навантажень при розгоні транспортного засобу необхідна додаткова буферна батарея – це може бути акумулятор чи батарея іоністорів.

Починаючи з кінця 2000-х рр. розробляються конструкції електричних автобусів із водневими ПЕ. Як правило, ємності для зберігання водню в стиснутому або зрідженому стані розміщують на даху таких транспортних засобів. Проблемою розвитку такого транспорту є організація промислового видобутку водню внаслідок електролізу води, що є дуже енергоємним процесом. У разі, якщо електроенергія генерується тепловими електростанціями, екологічна вигода від транспорту на водневих ПЕ вельми сумнівна, отож запровадження АЕТ із живленням від ПЕ потребує розвитку альтернативної або ядерної генерації. Крім того, ПЕ потребують удосконалення і здешевлення технології виготовлення, адже для ефективної роботи АЕТ потрібно, щоб вартість ПЕ знизилася до 100 – 150 дол. США в розрахунку на 1 кВт.

Механічні акумулятори енергії для АЕТ.

Як механічні акумулятори енергії використовувалися маховики з великим моментом інерції мас за рахунок масивного ободу. Такі маховики розміщували під підлогою транспортного засобу у вакуумній камері для зменшення тертя об повітря. Пасажирські транспортні засоби з приводом від маховика були побудовані малими серіями компаніями «Ерлікон» і «General Electric» у 40–60-х рр. ХХ ст. [20]. На зупинках контактні штанги гіробуса з'єднувалися з мережею змінного трифазного струму. Асинхронний електродвигун розкручував маховик до високої частоти обертання. Під час руху від маховика приводився генератор, який через електричну систему управління приводив ТЕД.

Запасу енергії маховика вистачало на пробіг до 9 км, проте дорожні затори завадили розвитку такого виду транспорту – під час зупинки внас-

лідок тертя маховика об повітря постійно зменшувався запас енергії.

Дослідники продовжують розглядати маховики як перспективні накопичувачі енергії: потужність маховикових накопичувачів сягає 5 – 10 кВт/кг, що значно перевершує ТАБ та батареї іоністорів. Питома енергоємність маховикових накопичувачів залежить від форми та матеріалу маховика. Для композитних матеріалів вона може сягати 15 – 50 Вт·год. Оптимальним способом збільшення енергоємності вважається підвищення частоти обертання маховика. Поки що в цьому напрямі ведуться лише теоретичні дослідження.

Висновки. Це дослідження показує, що найефективнішим джерелом живлення для АЕТ на сьогодні є ЛІА, які мають найвищу напругу елемента (3,6 В і вище) і високі показники питомої енергоємності та потужності в розрахунку на одиницю маси та об'єму. Саме тому більшість виробників використовує ЛІА в конструкції електробусів та тролейбусів із АХ. Активні дослідження та вдосконалення технології виготовлення ЛІА забезпечують покращання їх енергетичних характеристик та зниження вартості.

ЛІА можна ефективно використовувати як для міських, так і міжміських (на відстані до 200 – 250 км) пасажирських транспортних засобів. На сьогодні провідні виробники виготовляють обладнання (зарядні станції) для швидкої (динамічної) та нічної (статичної) зарядки. Основний недолік ЛІА та інших типів ТАБ – це відносно невеликий термін служби, який менший за термін служби кузовів та електроприводів. Але, незважаючи на це, літєві ТАБ на разі є найбільш розповсюдженим і перспективним джерелом живлення для АЕТ, включно з тролейбусами з АХ.

Перспективним джерелом енергії для міських електробусів і тролейбусів з АХ є батареї суперконденсаторів (іоністорів). Хоча за енергетичними показниками вони досі програють літій-іонним ТАБ, їх основна перевага – довговічність. Серійний зразок електробуса БКМ Е321 зі швидкою зарядкою батареї іоністорів має заявлену величину АХ до 40 км, чого достатньо для роботи на міських маршрутах. Проте батареї іоністорів не можуть бути використані в конструкції міжміського транспорту.

Водневі ПЕ забезпечують транспортним засобам пробіг від однієї заправки на рівні з ДВЗ, тому вони можуть використовуватися для транспорту, який працює на міських та міжміських маршрутах. ПЕ є екологічно чистими, а їх ККД є

на 45 – 50 % вищий, ніж у ДВЗ. Використання ПЕ як джерел живлення для АЕТ стримується їх високою вартістю, а також проблемами з виробництвом водню в промислових масштабах способом електролізу води. Застосування ПЕ на транспорті потребує активного впровадження ядерної й альтернативної енергетики замість теплової генерації.

АЕТ із комбінованими силовими установками, що містять ДВЗ, на сьогодні вже морально застарів, оскільки не є екологічно чистим видом транспорту. В Україні такий транспорт використовується у вигляді тролейбусів із АХ, більшість із яких має лише аварійний АХ від ДГУ. Зараз виробники розглядають комбіновані силові установки, які поєднують ТЕД та ДВЗ в основному для так званих «гібридних автобусів», які є значно економічніші, ніж традиційні.

Механічні акумулятори енергії – маховики – зараз не використовують у конструкції АЕТ, проте на рівні теоретичних досліджень вони розглядаються як перспективне джерело енергії для міського АЕТ.

Бібліографічний список

1. Богдан Н. В., Атаманов Ю. Е., Сафонов А. И. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет. Минск: Ураджай, 1999. 346 с.
2. Богдан Н. В., Николаев В. П., Сафонов А. И. Перспективные направления развития городского нерельсового транспорта. Минск: Ураджай, 1999. 64 с.
3. Будівництво троллейбусної лінії від розворотного кола «Героїв Праці» до розворотного кола «Північна Салтівка». URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2019-04-18-001590-b> (дата звернення: 28.09.2019).
4. Викиди забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю у атмосферне повітря (1990–2018 роки). Головне управління статистики у м. Києві: офіц. вебсайт. URL: <http://kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=1730&lang=1> (дата звернення: 28.09.2019).
5. Вучик В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни. Москва: Территория будущего, 2011. 576 с.
6. ДБН Б.2.2-12:2018. Планування і забудова територій. [Чинний від 2018-09-01]. Київ: ДП «Укравхбудінформ», 2018. 179 с. (Державні будівельні норми України).
7. ДБН В.2.3-18:2007. Споруди транспорту. Трамвайні і троллейбусні лінії. Загальні вимоги до проектування. [Чинний від 2008-01-01]. Київ: ДП «Укравхбудінформ», 2008. 58 с. (Державні будівельні норми України).
8. Ефремов И. С. Троллейбусы: теория, конструкция и расчет: учеб. для вузов по спец. «Городской электрический транспорт». Москва: Высш. шк., 1969. 488 с.
9. Кедринский И. А., Яковлев В. Г. Li-ионные аккумуляторы. Красноярск: Платина, 2013. 268 с.

10. Модернизация троллейбусов с заменой системы управления тяговым двигателем и установкой дизель-генератора: проспект-каталог. Киев: Ди Елком Україна, 2017. 20 с.
11. Нижниковский Е. А. Современные электрохимические источники тока: монография. Москва: Радиотехника, 2015. 296 с.
12. Овсянников Е. М., Долбилин Е. В., Кошеляев Е. М. Электрооборудование автотранспортных средств с тяговыми электроприводами. Москва: Палеотип, 2010. 364 с.
13. Про міський електричний транспорт: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15> (дата звернення: 28.09.2019).
14. Трамваї № 6 та № 2 відсьогодні їздять за новими маршрутами – у Вінниці відкрито ново-збудовану колію. *Вінницька міська рада*: офіц. вебсайт. URL: <https://www.vmr.gov.ua/Lists/CityNews/ShowNews.aspx?ID=1709> (дата звернення: 28.09.2019).
15. Троллейбус городской ЮМЗ Т2.09. Техническое описание. Днепропетровск: ЮМЗ, 2008. 124 с.
16. Троллейбус грузовой КТГ-1: руководство по эксплуатации, обслуживанию и ремонту. Киев: Киев. завод электротранспорта им. Ф. Дзержинского, 1978.
17. У Львові відкрили для руху новозбудовану лінію трамвая на Сихів. *Львівська міська рада*: офіц. вебсайт. URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/city/transport/235674-u-lvovi-vidkryly-dlia-rukhu-novozbudovanu-liniiu-tramvaia-na-sykhiv> (дата звернення: 28.09.2019).
18. Хрусталеv Д. А. Аккумуляторы. Москва: Изумруд, 2003. 224 с.
19. Электробус модели E433 «VITOVТ MAX ELECTRO». URL: <https://bkm.by/catalog/elektrobus-modeli-e433-vitovt-max-electro/> (дата обращения: 28.09.2019).
20. Habarda D. Nove dopravne systemy v mestkey hromadnej dopravne. Bratislava: Vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatury «ALFA», 1986. 216 с.
21. SKODA. Trolley / Battery BUSES: проспект-каталог. Пльзень: SKODA ELECTRIC a.s., 2018. 22 с.
22. Solaris: Napedy alternatywne. Katalog produktowy 2019. Ovinska: Solaris Bus & Coach S.A., 2019. 8 с.
23. Światowa premiera > Hydrogen. URL: <https://www.solarisbus.com/pl/pojazdy/napedy-zeroemisyjne/hydrogen> (Last accessed: 29 September 2019).

Стаття надійшла 03.10.2019