

**Харченко В.Ф.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

**Козлова О.С.**

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

## ДО ПИТАННЯ РЕАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

*Пропонуються методи визначення потенціалу енергозбереження на міському електричному транспорті та прогнозу потреби енергоресурсів на перспективу. Це дає змогу ефективно використовувати технічні засоби і технології енергозбереження усіх служб електротранспортної галузі для зниження питомих витрат енергоресурсів та енергоємності міського електротранспорту загалом. Зокрема, розглядаються можливості енергоефективної роботи у сфері організації процесу перевезень, рухомого складу міського електричного транспорту, систем тягового та зовнішнього енергопостачання, колійного господарства. Також особливу увагу приділено питанням енергозбереження в нетяговій енергетиці електротранспортної галузі.*

**Ключові слова:** електричний транспорт, енергоресурси, потенціал, енергозбереження, питомі витрати.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.** Надійна та енергоефективна робота міського електричного транспорту є одним із найважливіших показників соціально-економічної стабільності держави, що безпосередньо впливає на ефективність систем міського господарства, підприємств, організацій всіх галузей економіки країни. Як свідчить досвід окремих міст та країн, вектором транспортної політики є створення інтегрованих транспортних систем, а саме взаємозв'язок залізничного, авіаційного і міського транспорту для ефективного переміщення значних пасажиропотоків на станціях пересадки з одного виду транспорту на інший, наприклад, міський електричний транспорт – метрополітен – електрифіковані залізниці та аеропорти.

Основу енергетичних ресурсів міського електротранспорту становить електрична енергія, яка до 90–95% споживається з метою пасажирських перевезень (на тягу) і 5–10% – на внутрішні технологічні потреби транспортних підприємств [1, с. 13].

Аналіз реалізації програм енергозбереження на електричному транспорті (трамвайні і тролейбусні мережі) показав різну міру впливу господарств, що забезпечують процес перевезень, на його енергетичну ефективність (рис. 1).

Основними в цьому питанні є ремонтно-експлуатаційні підприємства рухомого складу електричного транспорту (трамвайні та тролейбусні депо): на їхню частку припадає 53–55% економії енергетичних ресурсів. Інші складники енерго-

ефективності доводяться на енергослужбу (системи електропостачання трамвайно-тролейбусних мереж) (20–25%), службу колії (9–10%) і службу руху (15–22%). Ці дані дають змогу міським адміністраціям ранжувати міру участі і спрямованість фінансування заходів господарств з енергозбереження і підвищення енергетичної ефективності [2, с. 180].

Безперервне та ефективне функціонування галузі міського електричного транспорту також залежить від надійної та якісної роботи систем зовнішнього електропостачання [3, с. 7].

Енергетичні технічні засоби і технології міського транспорту, що знаходяться в експлуатації на момент ухвалення програм із підвищення енергоефективності, мають різний доступний ресурс енергозбереження. Для кожного з них він визначається початковою енергоефективністю, яка закладена у процесі виготовлення пристрою, подальшими умовами і режимами роботи пристроїв, ступенем їх завантаженості, зносом, старінням та ін. Причому впродовж попередніх періодів експлуатації енергетичних пристроїв могли здійснюватися додаткові (крім закладених при виготовленні) спеціальні цілеспрямовані заходи з підвищення енергоефективності, які продиктовані відмінністю реальних умов експлуатації від закладених спочатку, подальшою модернізацією пристроїв та ін.

З початком реформування міського електричного транспорту вирішальним моментом розробки

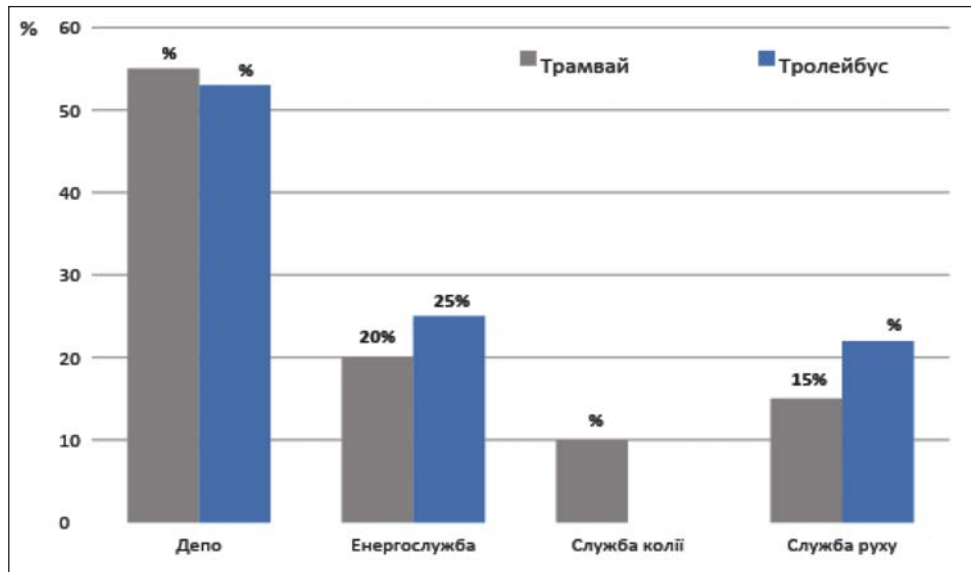


Рис. 1. Долі основних учасників процесу перевезень у зниженні витрати енергоресурсів на перевезення пасажирів міським електричним транспортом

подальших етапів реалізації програм енергозбереження є оцінка можливого залишкового і доступного потенціалу підвищення енергоефективності пасажирських перевезень, який може бути здійснений у найближчій і віддаленій перспективі.

**Постановка завдання.** Прогнозування реальних резервів (потенціалу) енергозбереження технічних засобів і технологій міського електротранспорту є однією з ключових задач програм енергозбереження. При цьому варто враховувати те, що до початку прогнозованого періоду в підрозділах електротранспорту вже здійснювалася активна діяльність з енергозбереження. Багато резервів енергозбереження (особливо легкодосяжних) було вибрано і вичерпано в минулі роки.

Таким чином, ставиться задача визначити для основних технічних засобів і технологій у всіх сферах діяльності підприємств міського електротранспорту технічно досяжні й економічно виправдані граничні значення показників, що впливають на енергоспоживання (реальний потенціал енергозбереження).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Технічно досяжними й економічно виправданими показниками, що впливають на енергоспоживання, є:

- для організації процесу перевезень – це комплекс показників експлуатаційної роботи, що істотно впливають на енергоспоживання (обсяг пасажирських перевезень, середня вага вагону трамваю та тролейбусної машини, експлуатаційна та середня ходова швидкості, маршрутизація пасажиропотоків, частка нульового пробігу (від-

стань від депо до точки виїзду рухомої одиниці на свій маршрут) електрорухомого складу, затримки трамвайних вагонів та тролейбусів на перехрестях, обмеження швидкості руху електричного транспорту, введення рухомих одиниць у графік);

- для рухомого складу трамваїв і тролейбусів – максимальний рівень експлуатаційного коефіцієнта корисної дії, реалізація рекуперативного гальмування, компенсація реактивної потужності, мінімальний рівень коефіцієнта тари, максимальні значення місткості і навантаження на вісь, мінімальна сила опору руху, мінімальний рівень витрати паливо-енергетичних ресурсів на опалювання і вентиляцію рухомого складу, сервісне обслуговування пасажирів. При цьому мають бути дотримані всі санітарні й екологічні нормативи комфортного перевезення пасажирів;

- для систем тягового електропостачання – мінімальний рівень технологічних втрат, мінімізація небалансу (умовних втрат) і перетоків потужності;

- для пристроїв колії – мінімальний рівень опору колійних конструкцій руху трамваю.

Як показує експлуатаційна практика, така оптимізаційна задача добре апроксимується експоненціальними залежностями, особливо в умовах багатofакторного впливу, яким і є процес формування питомої витрати енергоресурсів на тягу (тільки у сфері організації процесу перевезень діють 8 значущих факторів, а загалом їх понад 30).

Стратегію енергозбереження на прикладі оптимізації енерговитрат на міському електричному транспорті графічно можна представити у вигляді діаграми на рис. 2 [4, с. 18].

Спочатку вся система працює на стадії I, займаючи проміжне положення  $i$ ; у цьому разі фактичний к.к.д. всієї системи нижче ідеального ( $\eta = 1$ ), утворюючи певний ресурс енергозбереження.

Під ідеальним тут розуміється стан системи, коли в чистому вигляді витрати енергії з переміщення пасажирів відбуваються за відсутності втрат у всіх колах системи.

Стратегія енергозбереження полягає в прагненні до максимального використання ресурсу енергозбереження шляхом технічно досяжних і економічно виправданих заходів. Причому, насамперед, використовуються, звичайно, найбільш ефективні і маловитратні механізми економії енергоресурсів. Тому на першому етапі процес підвищення енергоефективності йде найактивніше, поступово уповільнюючись у міру впровадження дорожчих, але менш ефективних заходів з енергозбереження.

Стадія I – найефективніша і масово використовується на практиці. Існує певний граничний стан (точка X на рис. 2), коли всі технічно досяжні і економічно виправдані (за терміном окупності) рішення реалізовані, і система працює з к.к.д.  $\eta_1$  і оптимізованими втратами енергії  $R_{\text{опт}}$ .

Стадія II, коли зниження питомої витрати енергоресурсів можливе технічно, але з більш витратною ціною (великий термін окупності), використовується набагато рідше – наприклад, в умовах дефіциту енергоресурсів або дуже високих тарифів на них. Для тягової мережі прикладом роботи на стадії II може бути застосування в елементах тягового електропостачання поки що дуже дорогого явища надпровідності з метою подальшого зниження  $R_{\text{опт}}$ .

Стадія III використовується лише з науковою метою і в експериментальних умовах у разі необхідності відтворення граничних можливостей системи.

Таким чином, у межах задач енергетичної стратегії необхідне максимальне використання стадії I з наближенням роботи всіх технічних засобів, що забезпечують процес перевезень до точки X, тобто з максимальним використанням реального ресурсу енергозбереження на тягу та нетягової енергетики.

Також слід мати на увазі, що викладена модель стратегії підвищення енергетичної ефективності стосується будь-якої діючої технічної або технологічної системи. Якщо використання реального резерву підвищення її ефективності за будь-яких причин недостатньо, то необхідний перехід до нової інноваційної системи, що реалізує якісну і кількісну зміну в проблемі енергозбереження.

Модель формування енергозберігаючої діяльності міст України в галузі електричного транспорту ілюструється зіставленням динаміки зміни обсягів пасажирських перевезень і використання енергоресурсів за минулий період 1999–2018 рр. для всієї України (рис. 3, 4). Дані для аналізу отримані в [5].

Причому характерно, що практично за усі роки спостерігається зниження обсягів транспортної роботи (у % до попереднього року), тоді як динаміка споживання енергоресурсів міським електричним транспортом в цілому по Україні помітно зростає, що свідчить про нерезультативність реалізації програм енергозбереження та організаційно-технічних заходів, спрямованих на ефективність використання енергоресурсів. Разом із тим

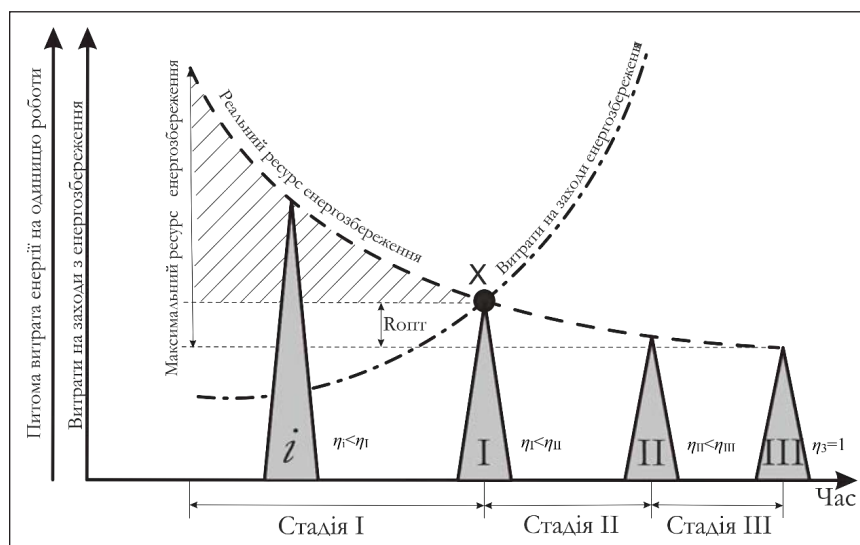


Рис. 2. Стратегія визначення потенціалу енергозбереження міського електричного транспорту

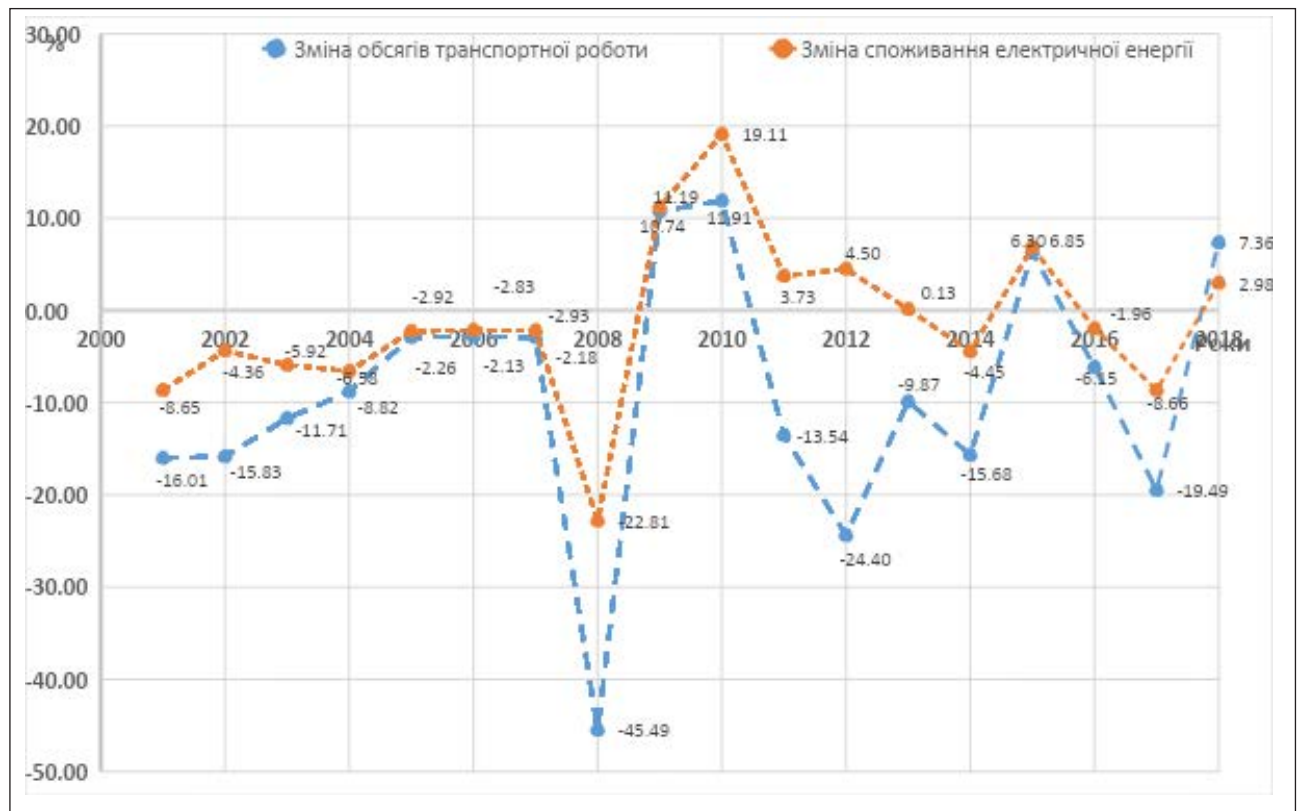


Рис. 3. Динаміка зміни загального обсягу перевезень (тис. пас-км) і споживання енергоресурсів (тис. кВт-год) трамвайними підприємствами України, у % до попереднього року

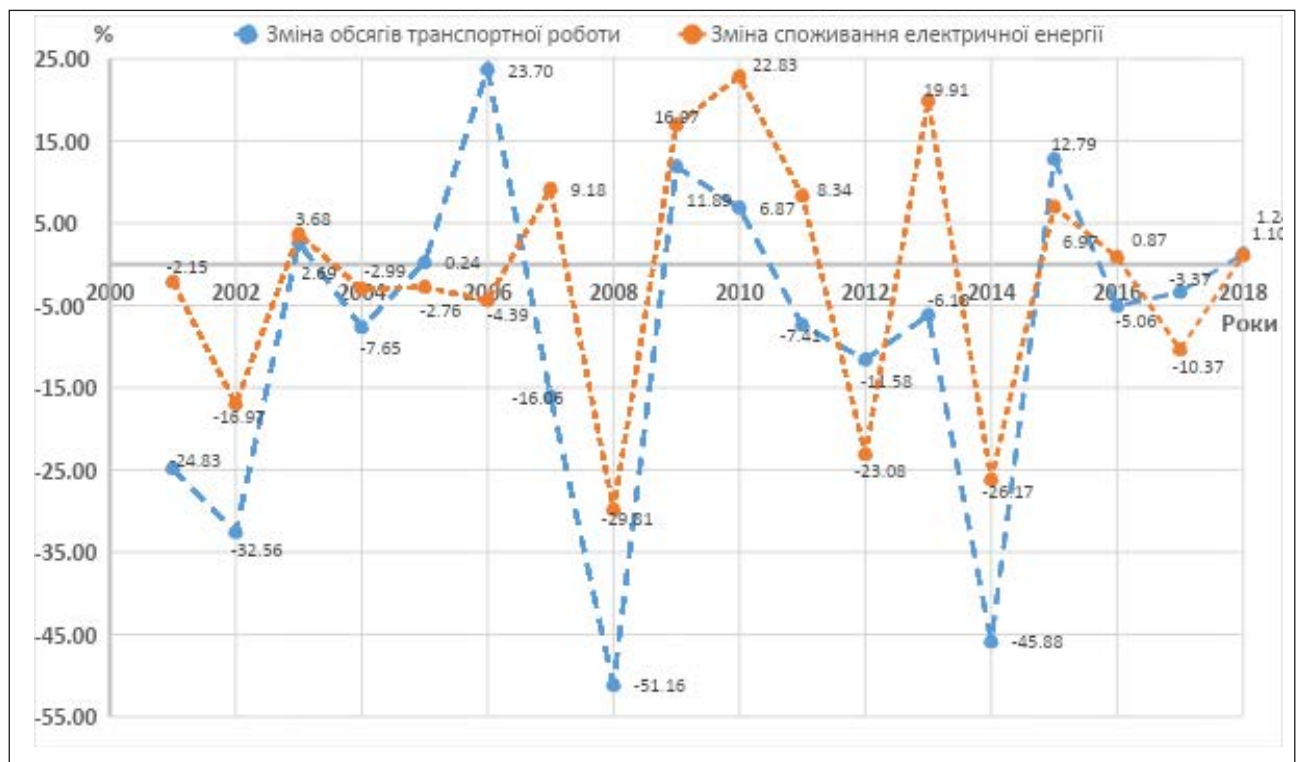


Рис. 4. Динаміка зміни загального обсягу перевезень (тис. пас-км) і споживання енергоресурсів (тис. кВт-год) тролейбусними підприємствами України, у % до попереднього року

є тенденції до поліпшення ситуації: в останні п'ять років у тролейбусних господарствах м. Дніпра спостерігається зростання транспортної роботи і зменшення витрат енергоресурсів. Для позитивної зміни, наведеної на рис. 3, 4, динаміки необхідне максимальне використання реального потенціалу енергозбереження та інновацій в області підвищення енергетичної ефективності рухомого складу та інфраструктурних складників на всіх етапах реформування електротранспортної галузі до створення моделі корпоративного управління.

Основними енергозберігаючими технічними рішеннями і технологіями, на які має бути орієнтована енергетика міського електричного транспорту **на перспективу**, є:

- створення нового покоління енергетично ефективного рухомого складу на основі останніх досягнень науково-технічного прогресу в цій області;
- підвищення рівня напруги передачі енергії до електрорухомого складу для швидкісних ліній;
- використання накопичувачів енергії в основних технологічних процесах і технічних засобів її генерації, включаючи теплову і механічну енергію;
- підвищення ефективності рекуперативного гальмування як одного з істотних факторів енергозбереження в електричній тязі;
- застосування енергоефективних технологій управління процесом перевезень, у тому числі з використанням на рухомому складі пристроїв і систем супутникової навігації;
- перехід на перетворювальну техніку на основі досягнень в області силових керованих напівпровідникових елементів і безмасляне, бездугове комутаційне електроустаткування, а також на сухі трансформатори;
- активний перехід на високоекономічні засоби світлової сигналізації й освітлення, в тому числі на основі світлодіодної техніки;
- створення єдиної системи управління якістю електроенергії з метою дотримання встановлених показників її якості і споживаної реактивної потужності на основі використання фільтр-пристроїв, накопичувачів електроенергії, систем контролю і управління цими показниками;
- широкомасштабне впровадження засобів технічного діагностування, передусім, в електроенергетиці;
- застосування в пасажирських вагонах, будівлях, спорудах і комунікаціях теплоізоляційних матеріалів нового класу і сучасних енергоекономічних кліматичних пристроїв;

– перехід при створенні пасажирського рухомого складу на матеріали і конструкції зі знизеним коефіцієнтом тари (алюмінієві сплави, конструкційні пластики та ін.);

– використання досягнень в області надпровідності, водневої енергетики, теплових насосів, паливних елементів, технологій утилізації відходів виробництва, вітрової і сонячної енергії, енергоефективних і озонобезпечних холодагентів;

– застосування новітніх технологій навчання для фахівців, які обслуговують і експлуатують ресурсо- й енергозберігаючі засоби, що впроваджуються.

За багатьма з перерахованих засобів і технологій у минулий період на підприємствах міського електричного транспорту України велися розробки та здійснювалося впровадження дослідних зразків.

Водночас основну роль у формуванні енергетичного балансу і зниженні як питомих, так і абсолютних показників енергоспоживання на електротранспортних підприємствах України відіграватимуть такі фактори:

– заміна рухомого складу і технічних засобів із перевищеним терміном експлуатації на нову техніку з високою продуктивністю та поліпшеними енергетичними показниками;

– подальше розширення ліній тягових мереж;

– організація прямування пасажирського рухомого складу за енергооптимальними графіками руху з оснащенням його системами автоведення.

У нетяговій енергетиці, пов'язаній із ремонтом рухомого складу і діяльністю об'єктів інфраструктури, має істотно зменшитися енергоспоживання через підвищення в 2–3 рази рівня надійності технічних засобів, збільшення напрацювання на відмову та міжремонтних пробігів.

В області **організації процесу перевезень** має вестися постійний моніторинг динаміки зміни основних факторів, що найбільше впливають на питому витрату енергоресурсів на тягу (табл. 1).

Багато з них, як показує попередній період, має позитивну динаміку. З урахуванням цього доцільно встановити планові рівні їх поліпшення, досягнення яких дасть змогу стабільно знижувати питому витрату енергоресурсів на тягу поїздів за цими показниками. Для підвищення відповідальності усіх учасників процесу перевезень за раціональне використання енергоресурсів при організації процесу перевезень дієвими видаються розробка і впровадження механізму віднесення додаткових енерговитрат, викликаних, наприклад, нагоном при порушеннях графіків руху рухомого

складу в результаті тимчасових обмежень швидкості руху транспорту і неграфікових зупинок, на винуватця таких необґрунтованих обмежень. Застосування енергооптимальних режимів управління рухом електротранспорту на основі систем автоведення, які враховують масу рухомого складу, план і профіль колії, умови організації пасажиропотоків, тягові і гальмівні характеристики трамваїв та тролейбусів, з досвіду великих міст Європи дає змогу економити енергоресурси в середньому на 2,0–2,5%, а на окремих маршрутах – до 10,0%.

Таблиця 1

**Планові рівні основних факторів, що впливають на питому витрату енергоресурсів на тягу**

Показник	Плановий річний рівень зміни показника, %
Середня вага рухомого складу	+1,0
Середня ходова швидкість рухомого складу	+0,5
Навантаження на вісь рухомого складу	+0,5
Доля нульового пробігу рухомого складу	-1,5
Затримки на перехрестях	-3,0
Обмеження швидкості руху в міських умовах	-2,0
Кількість неграфікових зупинок рухомого складу	-2,0
Час нагону графіку руху	-2,0

В області **електрорухомого складу** одним з основних пріоритетів є створення нового покоління енергетично ефективних трамвайних вагонів та тролейбусних машин, модернізація й оновлення електроприводів із наданням переваги асинхронним електричним машинам. Разом із тим не можна не зазначити поступове зростання інвентарної кількості рухомого складу трамваїв і тролейбусів у містах України: порівняно з кризовим 2008 р. у 2017 р. кількість вагонів трамваїв збільшилась на 383 одиниці, а тролейбусів – на 45 машин, незважаючи на постійне вибуття та списання рухомого складу внаслідок старіння. Перспективний електрорухомий склад має відповідати вимогам значного підвищення його енергетичної ефективності шляхом застосування інтелектуальних систем управління і енергозберігаючого тягового електроустаткування з рекуперативним гальмуванням в усьому діапазоні швидкостей руху. Досвід показує, що оптимізація електроспоживання має здійснюватися комплексно: як завдяки впровадженню нового і модер-

нізації наявного рухомого складу електричного транспорту, так і у сфері організації перевезень і в системах тягового електропостачання. З урахуванням цього задля зниження питомих енерговитрат мають вестися роботи в таких напрямках:

- розробка енергетичних діаграм ділянок роботи транспортних мереж, що визначають граничні рівні рекуперації електричної енергії;
- максимальне використання можливостей рекуперації електричної енергії на рухомому складі електричного транспорту;
- відновлення впровадження енергооптимальних технологій управління рухомим складом залежно від експлуатаційних умов;
- поліпшення тягово-енергетичних характеристик електрорухомого складу (мінімізація втрат енергії в тяговому ланцюзі і на власні потреби, оптимальне за енергоспоживанням електроустаткування).

**Система тягового електропостачання** міського електричного транспорту працює без належних резервів, необхідних для забезпечення прогнозованого зростання обсягу перевезень пасажирів, внаслідок обмеженої здатності навантаження пристроїв електропостачання. Окрім відсутності необхідних резервів потужності системи електропостачання, обмеження в споживанні електроенергії і, як наслідок, зниження провізної спроможності можуть бути викликані виводом в аварійний ремонт контактної мережі та устаткування підстанцій. Темп старіння пристроїв електропостачання за наявного дефіциту фінансування продовжує випереджати темпи реконструкції. Незважаючи на те, що на 25% тягових підстанцій були замінені пристрої та системи телемеханіки на сучасні системи фірми «Лоза», з терміном служби понад 40 років нині працюють 75% від загальної кількості тягових підстанцій міського електричного транспорту. Сучасне обладнання дасть змогу підвищити енергоефективність тягової підстанції на 15–20% за рахунок масо-габаритних характеристик, застосування сучасних матеріалів і електроніки, відсутності додаткового охолодження. На цей час необхідна повна реконструкція більше 60% довжини контактної мережі та тягових підстанцій.

**В колійному господарстві** трамвайних підприємств України майже відновлена довжина колії 17-річної давнини. В роки розквіту галузі довжина колії становила близько 2,5 тис. км. У 2001 р. внаслідок кризи в 90-х рр. загальна довжина дорівнювала приблизно 2,1 тис. км, тоді як наприкінці 2018 р. був зафіксований показник майже 2,0 тис. км.

З метою зниження витрати енергоресурсів у рейковій мережі доцільно, наприклад, застосовувати новітні термозміцнені трамвайні рейки, а також методи та засоби зниження величини блукаючих струмів. Збереження темпу реалізації вказаних заходів у колійному господарстві і надалі дасть змогу забезпечити 5–6% зниження питомих енерговитрат на тягу поїздів.

Значний потенціал енергозбереження зосереджений у **нетяговій енергетиці**, що забезпечує інфраструктурну складову частину процесу перевезень. Потенціал підвищення енергетичної ефективності споживання електроенергії на нетягові потреби може бути реалізований за такими напрямками:

- зниження споживання електричної енергії на нетягові потреби шляхом впровадження сучасних, енергоекономічних технічних засобів і технологій;
- вдосконалення виробничо-технологічних процесів ремонту рухомого складу і колії;
- зниження втрат електричної енергії в мережах нетягового електропостачання.

У сегменті умовно-постійної складової частини витрат електроенергії на нетягові потреби (допоміжний характер виконання технологічного процесу) помітного зниження електроспоживання можна домогтися шляхом впровадження інтелектуальних систем управління освітленням, заміни ламп розжарювання і газорозрядних ламп на світлодіодні джерела світла, що дасть змогу понизити витрати електроенергії на освітлення до 30% і удвічі – на роботу пристроїв світлової сигналізації. Очікувана економія енергоресурсів може становити 12–15% від загального споживання на ці потреби.

У сегменті змінної складової частини електроспоживання на нетягові потреби (зумовлена виконанням основного виду експлуатаційної роботи і залежить від її обсягу) більше 80%

витрати електричної енергії припадає на виробниче устаткування. Одним із перспективних напрямів зниження витрати електричної енергії, яке знаходить дедалі ширше застосування, є впровадження частотно-регульованого приводу компресорів, насосів, вентиляторів і т. д. В області електротермічної обробки дедалі більшого поширення набувають комбіновані системи нагріву (індукційний, із використанням альтернативних енергоресурсів тощо), вакуумні електропечі і системи автоматичного управління електротермічною обробкою. Ці й інші технічні рішення в сукупності із заміною електроустаткування надмірної потужності і проведенням організаційних заходів, які спрямовані на забезпечення раціонального використання електричної енергії, дадуть змогу понизити її витрату на нетягові потреби за змінною складовою частиною до 15,8%.

Відповідно, потенціал економії енергоресурсів на нетягові потреби становить від 20 до 33% від обсягу його споживання на ці потреби за наявного обсягу виконуваної ремонтно-експлуатаційної роботи.

**Висновки.** Запропоновано метод визначення потенціалу енергозбереження на міському електричному транспорті, що дає змогу ефективно використовувати технічні засоби і технології енергозбереження усіх служб електротранспортної галузі задля зниження питомих витрат енергоресурсів та енергоємності міського електротранспорту загалом.

Запропоновано максимальне використання рекуперації (економія до 10% електроенергії); застосування компенсаторів реактивної потужності в оптимальному поєднанні з поперечною і поздовжньою компенсацією реактивної потужності в мережах зовнішнього енергопостачання тягових підстанцій (економія до 3–5% електроенергії).

#### Список літератури:

1. Гордієнко О.С. Енергозбереження транспортних підприємств. *Енергетика и энергосбережение. Технологический аудит и резервы производства* ISSN 2226-3780. 2012. № 5/1(7). С. 13–14.
2. Далека В.Х. Методологічні аспекти ресурсозбереження на міському електричному транспорті. *Коммунальное хоз-во городов*. Вып. 49. 2003. С. 179–184.
3. Говоров П.П., Харченко В.Ф., Говоров В.П. Автоматизація керування режимами міських електричних мереж : монографія. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. 229 с.
4. Доманський І.В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями : монографія. НТУ «ХПІ». Харків : вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. 224 с.
5. Аналітична інформація. Корпорація підприємств міського електротранспорту України : офіційний веб-сайт. URL: <http://korpmet.org.ua/> (дата звернення 13.03.2019).

### **К ВОПРОСУ РЕАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

*Предлагаются методы определения потенциала энергосбережения на городском электрическом транспорте и прогноза потребности энергоресурсов на перспективу. Это позволяет эффективно использовать технические средства и технологии энергосбережения всех служб электротранспортной области для снижения удельных расходов энергоресурсов и энергоемкости городского электротранспорта в целом. В частности, рассматриваются возможности энергоэффективной работы в сфере организации процесса перевозок, подвижного состава городского электрического транспорта, систем тягового и внешнего энергоснабжения, путевого хозяйства. Также особое внимание уделено вопросам энергосбережения в нетяговой энергетике электротранспортной отрасли.*

**Ключевые слова:** *электрический транспорт, энергоресурсы, потенциал энергосбережения, удельные расходы.*

### **ABOUT REAL POTENTIAL OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT**

*The methods of determining the energy saving potential of urban electric transport and forecasting the energy needs for the future are proposed. This allows efficient use of technical means and technologies of energy saving of all services of the electric transport industry to reduce the specific energy consumption and energy intensity of urban electric transport in general. In particular, they consider the possibilities of energy efficient work in the field of organization of the process of transportation, rolling stock of urban electric transport, traction and external power supply systems, track economy. Also, special attention is paid to the issues of energy saving in the non-traction energy of the electric transport industry.*

**Key words:** *electric transport, energy resources, potential, energy saving, specific costs.*