

Українська державна академія залізничного транспорту

Карпушин Едуард Іванович

Наукові основи енергозберігаючої технології експлуатації засобів міського транспорту

УДК621.331

05.22.20 - Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Харків- 2001

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі “Міський електричний транспорт” Харківської державної академії міського господарства Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, професор Котенко Анатолій Миколайович, завідувач кафедри Української державної академії залізничного транспорту

Доктор технічних наук, професор Доля Віктор Костянтинівич, завідувач кафедри Харківського Національного автомобільно – дорожнього технічного університету

Доктор технічних наук Зозулін Юрій Васильович, заступник генерального конструктора – головний науковий співробітник Науково-Виробничого Об’єднання “Електроважмаш” Міністерства промислової політики України, м. Харків

Провідна установа

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, кафедра “Локомотиви”, м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться 25.10.2001 р.о 13 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту

Автореферат розісланий 21.09. 2001 р.

ВСТУП

Одними з найпотужніших споживачів електроенергії в містах України є підприємства з експлуатації міського пасажирського електрифікованого транспорту – трамвая і тролейбуса. За більш ніж сторічне існування міського електротранспорту ця галузь розвинулася до розмірів, що набули стратегічного значення для економіки держави, і навіть за умов економічної кризи зберігає провідну роль у міських пасажироперевезеннях.

Але при всій розвинутості міського електротранспорту в Україні, економічні аспекти, зокрема енергоефективність цього виду транспорту, довгий час залишалися поза увагою. Попри екологічні переваги, які має трамвай і тролейбус перед іншими видами пасажирського транспорту, вітчизняний електротранспорт в сфері енергоефективності суттєво їм поступається: якщо автобуси споживають 0,022 кг умовного палива на пасажирокілометр, то для трамвая цей показник становить 0,035, хоча автобус витрачає пальне протягом усього часу перебування на лінії, а трамвай чи тролейбус споживають енергію на рух тільки під час розбігів.

Більше того, усі технічні переозброєння, що відбулися за останні 40 років, супроводжувалися збільшенням питомого енергоспоживання - так, починаючи з 1958 року за перші двадцять років відбулося більше ніж трикратне збільшення енергоспоживання, у той час як обсяг перевезень зріс лише трохи більше ніж вдвічі. Збільшення випуску більш досконалого рухомого складу і зростання обсягів пасажироперевезень не супроводжувалось впровадженням організаційних та технічних рішень, які забезпечували б зменшення питомого енергоспоживання при експлуатації. Про слабку зацікавленість у енергозбереженні свідчить також обмежена кількість і фрагментарність досліджень з проблеми енерговитратності перевезень і їх недостатнє висвітлення в спеціальній літературі.

Невідповідність вимогам сучасної ринкової економіки заснованого на витратному принципі господарчого механізму експлуатації міського електротранспорту призвела його на межу деградації. Зволікання з ринковим реформуванням підприємств, які вимушені чи не половину пасажирів перевозити безоплатно, при безперервно зростаючих цінах на електроенергію і неможливості збільшення тарифів на перевезення фактично припинило відновлення основних фондів, наслідком чого стало скорочення парку рухомого складу і падіння обсягів транспортної роботи. Відсутність спрямованості підприємств на енергозбереження навіть при вимушеному зменшенні обсягів роботи не сприяє поліпшенню фінансових показників підприємств: так, вартість спожитої за 1998 рік електроенергії становила понад 150 млн. гр., що надмірним тягарем лягла на підприємства та міські бюджети, збільшуючи і без того великі заборгованості.

Магістральним шляхом подальшого розвитку міського електротранспорту є перехід на ринкову модель господарювання з пріоритетом енергозбереження, бо саме шлях переходу до енергозберігаючого типу економічного зростання визнано в Україні пріоритетним напрямком, про що неодноразово зазначалося в керівних документах Уряду, постановах Верховної Ради, Річних посланнях Президента України.

Навіть при морально та фізично застарілому рухомому складі на міському електротранспорті України об'єктивно існує вагомий потенціал енергозбереження, у чому можна переконатися, порівнюючи між собою питомі, на одиницю пробігу, витрати електроенергії по різних районах живлення і навіть по різних містах. Так, у приблизно однакових за розміром, рельєфом, кліматичними умовами, соціальною структурою населення та типажем тролейбусів, але різних за умовами реалізації руху містах Полтаві, Івано-Франківську та Кіровограді, питомі енергоспоживання на один машинокілометр складають відповідно 2,314; 2,137 та 1,859 кВтгодин, тобто відрізняються між собою більше ніж на 30 %. Ще більша різниця спостерігається при порівнянні середніх витрат енергії на перевезення одного пасажирів: у Полтаві, Івано-Франківську

та Кіровограді вони складають відповідно 0,331; 0,153 та 0,148 кВтгодин. Відмінність питомих енергоспоживань при експлуатації однотипних рухомих одиниць є свідченням залежності витрат енергії від умов реалізації руху, з чого випливає потенційна можливість зменшення енергоспоживання шляхом цілеспрямованого впливу на умови експлуатації. З точки зору соціально-економічної доцільності цього напрямку при недостатньому науковому опрацюванні експлуатаційне енергоспоживання та енергозбереження складають самостійний предмет дослідження.

Актуальність теми

З уваги на загрозу руйнування такої стратегічно важливої складової народного господарства, яким є і залишиться на найближчі десятиліття міський пасажирський електротранспорт, нагальним питанням є доведення витрат на електроенергію до мінімально можливих при даному складі і стані основних фондів. Це обумовлює об'єктивну потребу у створенні наукового підґрунтя енергозберігаючої технології експлуатації електротранспорту, що складає новий напрямок у науковому забезпеченні загальнодержавної проблеми енергозбереження. Розробка системи наукових положень енергозбереження при експлуатації є актуальним і важливим як для економіки міст, так і для всього господарчого комплексу держави.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до Програми заходів щодо ефективного використання та скорочення споживання природного газу в житлово-комунальній сфері (в розділі заходів по зменшенню обсягів споживання електроенергії міським електротранспортом) Державного Комітету України з енергозбереження, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України №751 від 15.06.1997 р. на виконання Комплексної державної програми енергозбереження України, схваленої постановою Кабінету Міністрів України №148 від 5.02.1997 р., а також Постанови Кабінету Міністрів України №769 від 2.06.1998 р. "Державна Програма розвитку рухомого складу". Дослідження закономірностей енергоспоживання виконано згідно з темами №1367/95 (№ Держреєстрації 0196U006494), № 1416/96 (№ Держреєстрації 0197U009213) Плану науково-дослідних робіт Харківської Державної Академії міського господарства, в яких авторові належать основні теоретичні дослідження та висновки.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є створення наукових основ енергозберігаючої технології експлуатації міського електротранспорту на підставі аналізу складових енергоспоживання та зв'язку витрат енергії на рух зі сталим комплексом умов реалізації виконаних обсягів транспортної роботи, як бази для розробки науково обґрунтованих заходів з енергозбереження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати вибір з альтернативи - представлення експлуатаційного енергоспоживання функціонуванням системи масового обслуговування, або лінійною моделлю вхід - вихідних співвідношень;
- обґрунтувати показники та порядок формування нормативів експлуатаційного енергоспоживання;
- визначити роль динамічних процесів в тягових передачах та екіпажних частинах рухомих одиниць у витратах енергії на рух;
- обґрунтувати приведення рухомих одиниць різних видів і типів до базової за енергоспоживанням;
- дослідити статистичні характеристики складових, що визначають механічну роботу при пусках, визначити характеристики розподілень наповнення рухомих одиниць та обґрунтувати методику розрахунку середньої дальності поїздок для визначення комерційної енергоефективності;
- обґрунтувати та розробити методику моделювання руху на довільному перегоні при аналітичному представленні залежностей діючих сил для визначення складових витрат енергії;
- формалізувати умови реалізації руху на підставі спрощених трапецеїдальних діаграм;
- розробити процедуру аналізу складових витраченої енергії по місту в цілому, по районах живлення та по маршрутах для визначення енергоефективності перевезень;

- обґрунтувати прийоми енергозаощаджуючого керування рухомою одиницею з застосуванням моделювання;
- розробити наукові основи енергозаощадження за рахунок удосконалення організації експлуатації;
- розробити наукове обґрунтування заходів з енергозбереження за рахунок удосконалення умов реалізації руху по перегонах з застосуванням спрощених трапецеїдальних діаграм.

Об'єктом досліджень є експлуатація засобів електрифікованого міського пасажирського транспорту, предмет досліджень становлять розрахунки, моделювання та залежності експлуатаційного енергоспоживання.

Завдання досліджень вирішуються методами математичної статистики і теорії імовірностей при встановленні статистичних залежностей спожитої на рух енергії від умов реалізації руху як в цілому по місту, так і по окремих районах живлення, застосуванням математичного моделювання при визначенні параметрів руху і витрат енергії окремої одиниці у детермінованій та стохастичній постановці, методами апроксимації гладких функцій при адекватній заміні кривих руху спрощеними трапецеїдальними діаграмами, методами наближеного розв'язання диференціальних рівнянь руху і експериментального підтвердження отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

Зв'язок між витратами енергії на рух та обсягами транспортної роботи вперше розглянуто в комплексі умов експлуатації в цілому по маршрутній системі, при конкретних умовах реалізації руху на окремому маршруті, на окремому районі живлення та при конкретних умовах експлуатації на приналежних до секцій перегонів, при даних властивостях рухомих одиниць та способах керування, що дає можливість транспортним підприємствам визначати ефективність витрат енергії на рух окремої одиниці, певної їх кількості на секції, на районі живлення, на маршруті та на маршрутній системі в цілому, і впроваджувати науково обґрунтовані заходи з енергозбереження з прогнозованим результатом при існуючому складі і стані основних фондів. Визначена роль динаміки тягових передач і екіпажної частини рухомих одиниць як причини додаткових витрат, що у зв'язку з енергоспоживанням досі не розглядалися. Розроблено і застосовано метод безпосереднього розв'язання диференціальних рівнянь для математичного моделювання руху на довільному перегоні, яка відрізняється від традиційного методу побудови кривих руху можливістю одразу визначати швидкість наприкінці зазначеної ділянки по заданим обмеженням. Вперше представлено експлуатаційне енергоспоживання на секції та районі живлення як марківською випадковою послідовністю енергоспоживань окремих рухомих одиниць, так і лінійною моделлю вхід - вихідних співвідношень, теоретично обґрунтовані основи інженерного розрахунку витрат енергії на ділянках та шляхи їх зменшення з застосуванням запропонованих спрощених діаграм руху.

Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових положень, висновків і рекомендацій базується на об'єктивному існуванні різниці у витратах енергії, що припадають на одиницю транспортної роботи, при різних умовах експлуатації по різних районах живлення, що свідчить про об'єктивне існування досліджених в роботі зв'язків між витратами енергії, показниками умов руху та властивостями рухомих одиниць. Достовірність отриманих результатів підтверджується співпаданням, з максимальною похибкою не більше 10%, фактичних, зафіксованих по електролічильниках тягових підстанцій, витрат енергії з розрахунковими витратами відповідно до теоретично оцінюваних умов експлуатації. Висновки щодо залежностей обсягів витраченої енергії від розрахованих оцінок факторів енергоспоживання на перегонів з застосуванням спрощених трапецеїдальних діаграм і статистичних показників руху перевірені і підтверджені на прикладах підприємств електротранспорту Харкова та Києва. Запропоновані в роботі методи апроксимації аналітичних розв'язань забезпечують співпадання з точними розв'язаннями при максимальній розрахунковій похибці не вище 3%. Достовірність результатів експериментального визначення параметрів руху та витрат енергії визначається класом точності приладів і точністю розшифровки, які вкупі обумовлюють максимальну похибку не більше 5%.

Наукове значення роботи.

Робота являє собою теоретичне узагальнення шляхів розв'язання проблеми підвищення енергоефективності пасажироперевезень на міському електрифікованому транспорті і впровадження науково обгрунтованих заходів з енергозбереження з прогнозованим результатом при існуючому складі і стані основних фондів, головню за рахунок удосконалення умов експлуатації та застосування прийомів раціонального керування рухомими одиницями. Отримані в роботі результати є доповненням та розвитком теорії експлуатації засобів транспорту, а також уточненням того розділу теорії електричної тяги, що вивчає закономірності перетворення механічної роботи до витрат енергії на рух окремої одиниці на заданому перегоні, на секції живлення, на маршруті та по місту в цілому.

Практичне значення одержаних результатів.

Державним Комітетом України з енергозбереження прийнято до впровадження методу складання енергетичних паспортів для всіх підприємств міського електротранспорту України в рамках Державної програми енергозбереження.

Впровадження результатів роботи в КП "Київелектротранс" та ХКП "Міськелектротранс" дозволило зменшити витрати енергії на 8,5 - 10,5% Державним Комітетом архітектури, будівництва та житлової політики України використано теоретично - експериментальний метод визначення витрат енергії на рух при розробці нормативів енергоспоживання.

Результати досліджень лягли в основу робочої програми учбової дисципліни "Ресурсозбереження на міському електротранспорті" для студентів усіх форм навчання у Харківській державній академії міського господарства, використано при створенні методичних вказівок для дипломного проектування з тематики енергозбереження при експлуатації міського електротранспорту.

Особистий внесок здобувача.

Одноосібно здобувачем опубліковано 16 статей [2 - 5, 7 - 17, 28]. В колективній роботі [1] здобувачеві належить концепція міського транспорту на засадах енергозбереження; в [7] здобувачем складена математична модель енергоспоживання та обгрунтована її адекватність. В роботі [19] здобувачеві належить теоретичне обгрунтування зменшення кількості одиниць в русі за рахунок перевідряджень. В колективній роботі [20] здобувачем доведена адекватність моделі; в [21] розроблено прилад для визначення розподілення швидкостей та приймалася участь у дослідних поїздках; у [22] виконано розшифровки отриманих за результатами експериментальних вимірювань даних. В опублікованих зі співавторами статтях [23 - 27], присвячених динаміці тягових передач та екіпажних частин рухомого складу у зв'язку з витратами енергії, здобувачеві належать складання та розв'язання рівнянь, а також співставлення отриманих експериментальних даних з теоретичними; в [28] здобувачеві належить участь у проведенні експериментів з визначення потужностей динамічних навантажень в тяговій передачі та розшифровка осцилограм.

Апробація результатів дисертації.

Результати досліджень доповідалися, обговорювалися і схвалені на:

Міжнародній науково-практичній конференції " Проблеми та перспективи ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві" (Харків, 12-14 жовтня 1995 р.);

Міжнародному семінарі "Сучасні системи управління муніципальними послугами" (Харків, 8-9 грудня 1999 р.);

двох засіданнях Бюро Північно-Східного відділення Національної Академії Наук України (1998 - 1999р);

щорічних наукових конференціях професорсько-викладацького складу Харківської Державної Академії міського господарства (1996 – 2000 р.).

Цілоком дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні кафедри "Міський електричний транспорт" Харківської державної академії міського господарства у 2000 р. за участю членів спеціалізованої вченої ради.

Публікації.

Матеріали дисертації опубліковано у 28 статтях у виданнях, затверджених ВАК України, і 4 тезах доповідей на міжнародних, республіканських та вузівських наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації.

Дисертація налічує 295 сторінок, 52 рисунки, 27 таблиць і складається зі вступу, 6 розділів, списку літературних джерел з 125 найменувань та 7 додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розглянуто сучасну ситуацію на підприємствах, що експлуатують трамвай і тролейбус, визначено, як одну з головних причин занепаду, надмірну енерговитратність пасажироперевезень, обумовлену затримкою з реформуванням галузі та недостатньою науковою базою експлуатаційного енергоспоживання та енергозбереження, сформульовано мету і задачі дослідження.

У **першому розділі** розглянуто сучасний стан наукового опрацювання експлуатаційного енергоспоживання на міському електротранспорті та сформульовано завдання, які необхідно вирішити в напрямку його зменшення. Відзначено внесок у цю проблему українських вчених, зокрема докт. техн. наук В.П. Векліча та проф. С.А. Реброва, який вперше провів систематизовані дослідження енергоспоживання на тролейбусному транспорті. Питання енергоефективності досліджувалися в роботах російських вчених наукової школи заслуженого діяча науки проф. Єфремова І.С., наукових колективів Академії комунального господарства ім. К.Д. Памфілова (Москва), зокрема в роботах проф. Д.К. Томляновича, а також Науково-дослідного та конструкторсько-технологічного інституту міського господарства (Київ), Харківської державної академії міського господарства. Проте й досі відсутня система наукових положень експлуатаційного енергоспоживання та енергозбереження як самостійного напрямку, відзначається фрагментарність відомостей про залежності витрат енергії на рух, недостатність публікацій щодо експлуатаційного споживання енергоспоживання та енергозбереження.

Доводиться, що існуючий показник енергоємності у Ватгодинах на тоннокілометр не відповідає сутності пасажироперевезень і не спрямовує підприємства на енергозбереження, тому повинен бути замінений на показник питомого енергоспоживання на одиницю транспортної послуги, що вимірюється у Ватгодинах на одиницю швидкості сполучення.

У найбільш загальному вигляді експлуатація міського електротранспорту може бути представлена процесом функціонування двоєдиної системи перетворення попиту населення на транспортні послуги, яке відображається інтенсивністю накопичення пасажирів на зупинках, у обсяги пасажироперевезень та, з урахуванням частки пільгового контингенту, у доходи, а також трансформації транспортної роботи у витрати енергії на рух. Попит на перевезення визначає частоту руху, а витрати енергії на даний обсяг транспортної роботи визначається властивостями конструкції рухомих одиниць, умовами реалізації руху та діями операторів (водіїв).

Якщо агрегувати фактори, що визначають обсяг енергоспоживання E на рух при виконанні певної транспортної роботи, по групах за однорідними ознаками, а самі групи розташувати по принципу причинно-наслідкової послідовності, то маємо модель з трьох вкладених одна в одну об'ємів (гіперсфер) $D_y \in D_{y.e.} \in D_k$

Технічними показниками (параметрами) факторів, що безпосередньо визначають енергетичну досконалість рухомого складу і утворюють простір $x_k \in D_k$, є питома (на одного пасажир) потужність тягового приводу, питома (на одного пасажир) вага тари, коефіцієнт пуску, питома опір рухові, коефіцієнт корисної дії електромеханічного перетворення енергії, втрати від динамічних процесів в тягових передачах та екіпажних частинах, степінь утилізації рекуперованої (за наявності рекуперації) під час гальмування енергії. До технічних показників факторів конструкції рухомого складу, що опосередковано впливають на енергоспоживання на рух, відносяться кількість та ширина дверей, швидкодія дверних приводів; висота підлоги салону відносно рівня пасажирського майданчика, кількість та висота сходинок; місткість салону. Сюди ж треба віднести показник середньої дальності поїздки, який хоч і не пов'язаний з досконалістю конструкції, але має безпосередній вплив на ефективність енергоспоживання незалежно від інших чинників.

Другу гіперсферу $x_j \in D_{y.e.}$ складають фактори умов реалізації руху, які при заданих показниках конструкції рухомого складу визначають величину енергоспоживання відповідно до об'єктивної необхідності вмикання тягових двигунів. Показниками цієї групи є довжини перегонів,

величини та довжини ухилів, кількість поворотів і спеціальних частин контактної мережі та рейкової колії, що потребують знижень швидкості та повторних пусків, кількість світлофорів тощо.

Третю (внутрішню) гіперсферу $x_i \in D_y$ складають показники, які при заданій конструкції рухомого складу та в заданих умовах експлуатації визначають вплив на енергоспоживання кваліфікації водіїв, якості управління рухомою одиницею. До них можна віднести швидкості початку та закінчення повторних пусків, швидкість та відстань до місця зупинки або ділянки обмеження швидкості в момент початку гальмування. Таким чином оцінка витрат енергії на рух однією рухомою одиницею n -ного типу при проходженні певної ділянки маршруту визначається лінійною моделлю:

$$E_n = \sum_{i_n} \sum_j \sum_k \psi(x_{i_n}, x_j, x_k) = \Psi(X).$$

Розмірність моделі значно зменшується, якщо уніфікувати всі види й типи рухомих одиниць за ознакою енергоспоживання при однакових умовах руху та однаковій якості управління.

Обґрунтовано вибір з альтернативи - представлення енергоспоживання моделлю масового обслуговування або лінійною моделлю вхід - вихідних співвідношень. Модель масового обслуговування враховує імовірнісний характер руху і потребує знання середніх значень витрат енергії для різних типів рухомого складу по видах споживання на секціях системи електропостачання. Завантаженості секцій системи електропостачання визначаються кількостями n_j рухомих одиниць, що одночасно перебувають на $j=1,2,\dots$ секціях, імовірностями p_{qj} реалізації k_{qj} видів енергоспоживань (пуск із зупинки, повторний пуск, пуск після зниження швидкості), показниками інтенсивностей потоків енергоспоживань по видах η_q та середніми їх тривалостями τ_q :

$$p_{qk_j} = \frac{\frac{1}{k_{qj}!} (\eta_q \tau_q)^{k_{qj}}}{\sum_{t=0}^{n_j} \frac{1}{t!} (\eta_q \tau_q)^t}, \quad k_{qj} = 0, 1, 2, \dots, n_j p_q.$$

За моделлю вхід - вихідних співвідношень витрати енергії $Q_{j,t}$ на секції довжиною L_j визначаються обсягом транспортної роботи $N_{j,t}$ приведених одиниць та питомим, притаманним саме цій секції на даний відтинок часу, питомим енергоспоживанням $e_{j,t}$. Ця модель базується на твердженні щодо стаціонарності та ергодичності випадкового процесу енергоспоживання на даній секції протягом певного часу. Коефіцієнт $e_{j,t}$ при відомих енергетичних властивостях конструкції рухомих одиниць та незмінному комплексі умов реалізації руху відіграє роль передаточної функції і може бути встановлений звичайними методами по даних витрат енергії на тягових підстанціях та звітних даних пробігу. Чинники Φ_{jk} з комплексу умов руху впливають на енергоспоживання як додатки з вагами π :

$$Q_s(t_0, t) = e_s(t_0, t) \cdot \sum_j N_j(t_0, t) \cdot L_j \cdot \left(1 + \sum_k \pi_k \Phi_{jk}\right), \quad j \in s.$$

При однаковості результатів визначення експлуатаційного енергоспоживання за першою та другою моделями лінійна модель вхід - вихідних співвідношень має переваги як менш громіздка і як така, що не потребує подробиць реалізації енергоспоживання одиниць різних типів.

Другий розділ присвячено ролі динамічних процесів у тягових передачах та екіпажних частинах рухомих одиниць в контексті енергоспоживання. оскільки досі не розглядався цілий ряд явищ, які традиційно складають предмет динаміки рухомого складу, але можуть мати безпосередній вплив на опір рухові та витрати енергії. Хоча властивості рухомих одиниць при експлуатації є заданими, досі не досліджувався зв'язок показників конструкції екіпажної частини з витратами енергії на рух та питома вага динамічних процесів у основному опорі рухові для визначення напрямків удосконалення конструкції.

Так, перетворення електроенергії до механічної роботи супроводжується обумовленими динамікою тягової передачі механічними втратами при трансформації моменту на валу двигуна

до сили на колесі; при вимушених коливаннях екіпажів та їх частин, як динамічних систем, відбувається розсіювання енергії коливань, що обумовлює періодичні зміни основного опору рухові і таким чином викликає додаткові витрати енергії. На трамвайних вагонах спостерігаються втрати енергії від релаксаційних автоколивань колісних центрів і ковзань бандажів на рейках; надлишкові ковзання коліс мають місце при звивистому русі та буксуванні.

Перетворення електроенергії до механічної роботи супроводжується обумовленими крутильними коливаннями в тяговій передачі механічними втратами при перетворенні моменту на валу двигуна до сили на колесі. В динамічній моделі тягового приводу як сукупності дискретних обертових мас J_{ik} , з'єднаних пружними, з урахуванням коефіцієнта поглинання енергії ψ , ланками з кутовими жорсткостями c_{ik} , передача моменту від якоря до коліс та дія моментів від кінематичних збурень δ_{ik} супроводжуються змінами кутів закручування φ , тобто крутильними коливаннями, згідно з рівняннями:

$$\sum_{k=1}^n \left[J_{ik} \ddot{\varphi}_k + c_{ik} \left(1 \pm j \frac{\psi}{2\pi} \right) (\varphi_i - \varphi_k) \right] - \sum_{i=1}^n \left(1 \pm j \frac{\psi}{2\pi} \right) \delta_{ik}(\varphi_k); \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \sqrt{-1}.$$

Експериментальне вимірювання діючих моментів виконувалося тензометруванням деформацій скручування обертових деталей - хвостовика якоря двигуна, карданного вала, осі тощо. Оскільки елементи тягової передачі обертаються, для передачі пропорційного деформації сигналу до фіксуючого приладу (осцилографа) використовувалась спеціальна система безперервного тензометрування та безконтактної індуктивної передачі.

З-за низьких частот ($\Omega = 65 - 250 \text{ с}^{-1}$) власних коливань крутильних систем в експлуатаційному діапазоні частот обертання двигунів мають місце крутильні резонанси, коли амплітуди пружних моментів при розбігах сягають до 30 - 50 % від середнього моменту на валу двигуна. Це викликає відповідне збільшення ефективного навантаження на зуб'я редуктора і збільшення втрат механічної потужності: так, замість 6,5 - 6,9% втрат в редукторі в робочому діапазоні потужностей, при резонансах має місце їх збільшення до 9,7 - 13%.

На трамвайних вагонах мають місце втрати енергії від релаксаційних автоколивань колісних центрів. Оскільки геометричні центри бандажу та осі колісної пари не співпадають на величину ϵ пружної деформації гумових елементів, поздовжнє, зі швидкістю V , переміщення центру обертання бандажу радіусом R буде більше переміщення осі на величину $\epsilon d\alpha$, $d\alpha = (V dt)/R$. Лінія, по якій відбувається деформація, буде нахилена, що означає появу поздовжньої сили, яка діє у протилежному відносно руху напрямку. Шлях, який пройде бандаж, менше на величину горизонтальної проекції деформації dx , а кут повороту бандажа - менший на величину $d\theta$: $\epsilon d\alpha = R d\theta + dx$. Використовуючи зв'язок між лінійними переміщеннями по горизонтальній та вертикальній осях координат, маємо диференціальне рівняння:

$$\omega \sqrt{x^2 + z^2} = \frac{d}{dt} (x + R\theta), \quad \omega = V/R.$$

При жорсткості на зсув c та кутовій жорсткості λc гумових елементів колеса сума моментів від пружних реакцій відносно точки стикання бандажу з рейкою складає:

$$cRx - (\lambda c\theta + cR^2\theta + czx) = 0.$$

Вертикальна сила викликає вертикальні переміщення приведеної до колісного центру маси M , до якої, крім колісного центру та половини осі, відноситься чверть маси візка:

$$M \ddot{z} + cz + \frac{c(\lambda + R^2)\theta + cRx}{\epsilon^2} x = Q.$$

Наведені рівняння утворюють сумісну систему, яка дійсна до моменту, коли поздовжня сила в місці стикання бандажу з поверхнею кочення рейки не зрівняється з горизонтальною реакцією - силою зчеплення T_ψ при коефіцієнті зчеплення ψ .

$$T_{\psi} = \psi \cdot P_{z(\min)} = P_{x(\max)}, \quad P_x = c \cdot \left(x + \frac{\lambda \cdot \theta}{R} \right).$$

В цей момент бандаж ковзає у напрямку руху з одночасним поворотом на кут θ назад відносно обертання осі з розрядкою деформацій, і таким чином після досягнення критичної швидкості

$$V_{кр} = \frac{\Omega_1 (\Omega_2^2 - \Omega_1^2) R}{2\Omega_2^2}, \quad \Omega_1^2 = c/M, \quad \Omega_2^2 = c(\lambda + R^2)/MR^2,$$

виникають релаксаційні автоколивання. Так, на вагоні Т-3, у якого квадрат частоти власних коливань $\Omega_1^2 = 2,593 \cdot 10^4 \text{ с}^{-2}$, статичний прогин пружних елементів $z_0 = 0,485 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ при навантаженні $Q = 3 \cdot 10^4 \text{ Н}$, при швидкості $V = 10 \text{ м/с} > V_{кр}$. сила натискання бандажу на рейку протягом 0,011 с збільшується від 30000 Н до 38500 Н, після чого спадає до 700 Н, а поздовжня сила зростає від нуля до 150 Н. У цей момент величина поздовжньої сили дорівнює граничній при заданому коефіцієнті зчеплення $\psi = 0,2$, з-за чого відбувається ковзання бандажу і накопичена енергія кутової та поздовжньої деформацій йде на роботу обертання та зсуву бандажу. Для даного прикладу середня поздовжня сила за цикл коливань складає 75 Н, що для 8 коліс вагону становить 600 Н, а це відповідає збільшенню питомого опору рухові 3 Н/кН.

При вимушених коливаннях екіпажів та їх частин, як динамічних систем, відбувається розсіювання енергії, яка визначається опосередковано через динамічні додатки до зчпної ваги G рухомої одиниці вертикальної сили ΔG натискання коліс на дорогу або рейки в формулі сили опору поступальному рухові:

$$A_w = \int_S \left[(G + \Delta G[V(S)]) \cdot w[V(S)] \right] dS,$$

де $w[V(S)]$ - функція питомого опору поступальному рухові, залежна від швидкості V та поздовжньої координати S . Дисипацію енергії коливань зазвичай визначають за гіпотезою комплексного опору, за якою крім пружної k складової пружні ланки мають гістерезис, оцінюваний коефіцієнтом h , тобто

$$c = k(1 + jh), \quad j = \sqrt{-1}.$$

Оскільки дані про імпеданс ресорних підвісок в літературі відсутні, їх визначення відбувалося експериментально шляхом запису переміщень кузова після скидання (стрибка) коліс з клинів висотою z_0 із наступним підбором частоти та коефіцієнта затухання до числового співпадання розрахованої та експериментальної кривої затухаючих коливань.

При одночастотних вимушених вертикальних коливаннях $z(t)$ кузова з частотою власних коливань Ω від нерівностей шляху $\zeta(V, S)$, які складають сукупність синусоїд з частотами кінематичних збуджень ω , маємо додаткові втрати енергії:

$$z = \frac{\xi}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega^2}\right)^2 + h^2}}, \quad \Delta G = zk.$$

$$\Delta A_w = \pi \cdot z^2 hk,$$

Розрахунки додатків до основного опору рухові та відповідних втрат енергії при вимушених коливаннях свідчать про те, що навіть при резонансах ці втрати можна не враховувати: наприклад, при вимушених коливаннях маточини тролейбусного колеса на шині під час резонансу від нерівностей дороги з шляховою частотою $62,8 \text{ с}^{-1}$ та амплітудою 1 см втрати складають 3,03 Нм, що відповідає збільшенню питомого опору рухові усього на 0,025 Н/кН, яким, очевидно, можна знехтувати.

На відміну від коливань, буксування рухомих одиниць призводить до суттєвих втрат енергії, що позначається на некоррельованому з умовами руху збільшенні енергоспоживання при погіршенні зчеплення - опаданні листя, випаданні снігу, ожеледях тощо. Це призводить до надмірних прискорень колісних пар, що втратили зчеплення, і обумовлює великі (до $1,5 \cdot 10^4$ Нм) втрати на тертя. Запобігти цих втрат можна застосуванням систем захисту від буксування, що слід розглядати як засіб підвищення енергетичної досконалості.

Надлишкові ковзання коліс з конічністю і мають місце при звивистому русі візків трамвайних вагонів, що спричиняє до збільшення питомих енергоспоживань на районах живлення, де експлуатується виключно трамвай і є довгі прямі ділянки. Ковзання реборд коліс, наслідком якого є боковий знос рейок, виникає при бокових коливаннях візків з масами m_T по поперечних координатах $y_{1,2}$. З-за наявності пружного зв'язку $c_{1,2}$ між приналежними до візків масами M_1, M_2 кузову та візками при перевищенні критичних швидкостей руху

$$V_{кр.1,2}^{(куз.)} = \sqrt{\frac{2c_{1,2}r_c s(1+\alpha^2)}{3M_{1,2} \cdot i}}$$

виникає резонанс, і сили крипу неспроможні забезпечити затухання коливань. Це відбувається при зміні знаку показника експоненти в розв'язанні:

$$y_{m1,2} = e^{-\frac{a\Omega^2 t}{2(3\Omega^2 + v^2)}} [B_1 \cos \Omega t + B_2 \sin \Omega t]; \quad \Omega = V \sqrt{\frac{i}{r_c s(1+\alpha^2)}};$$

$$v_{1,2}^2 = \frac{2c_{1,2}}{M_{1,2}}; \quad a_{1,2} = \frac{c_{1,2} V}{2f} - \Omega^2 \frac{m_m V (\rho_{mz}^2 + s^2(1+\alpha^2))}{4fs^2(1+\alpha^2)},$$

де $B_{1,2}$ - постійні інтегрування. Оскільки навіть на магістральному транспорті методи безпосереднього вимірювання крипу невідомі, коефіцієнти крипу f визначалися розрахунком.

Після вільного руху протягом часу t_0 між ребордами та боковими поверхнями рейок виникає обумовлена поперечним натисканням сила тертя, яка з урахуванням того, що різниця між радіусом інерції мала:

$$[\rho_{tz} - s(1+\alpha^2)] \rightarrow \epsilon, \quad \epsilon \approx 0,$$

($\alpha=l/s$, де $2l, 2s$ - база візка та ширина колії), дорівнює:

$$T = 2m_m \delta \Omega^2 k_{mp} e^{-\frac{a\Omega^2(t-t_0)}{2(3\Omega^2 + v^2)}} \left(1 + \frac{a^2 \Omega^2}{(3\Omega^2 + v^2)^2} \right) \sin \Omega (t - t_0).$$

Так, реборди вагону Т-3 з $v=7,55 \text{ c}^{-1}$, $\Omega=6,4 \text{ c}^{-1}$, при конічності бандажів коліс $i=0,2$ та середньому радіусі $r_c=0,35 \text{ м}$ при русі у колії з зазором $\delta=4 \text{ мм}$ зі швидкістю $V=12 \text{ м/с}$ розвивають силу тертя

$$T = 442,3 \cdot e^{0,054t} \sin 6,4t.$$

Максимум бокової сили на середині першої хвилі бокових коливань складає 456 Н, і таким чином робота тертя реборд по рейкам на першій хвилі бокових коливань складає 14,1 Нм. На перший погляд це небагато, але якщо врахувати усі 8 коліс та кількість хвиль бокових коливань, що реалізуються на перегоні, втрати енергії стають суттєвими: при 10 хвилях, тобто на довжині у 132 м, вони становлять 11280 Нм, або 5% від роботи пуску.

Таким чином лише певна частина динамічних процесів, які постійно або періодично діють при русі, характеризують енергетичну досконалість рухомих одиниць і визначають питомих енергоспоживання при рівних інших умовах. Наявність в колесах трамвайних вагонів пружних елементів обумовлює релаксаційні автоколивання колісного центру відносно бандажу на рейці після досягнення критичної швидкості руху. Автоколивання супроводжуються ковзанням бандажів в моменти досягнення мінімуму вертикальної складової пружної реакції, що обумовлює збільшення витрат енергії на подолання опору рухові порівняно з вагонами без пружних елементів

в колесах на 40%. Вимушені вертикальні коливання кузовів на ресорах та окремих частин екіпажів як динамічних систем, поздовжні коливання трамвайних візків відносно кузовів та поздовжні коливання одиниць у складі поїзда супроводжується незначним збільшенням основного опору рухові, яке у розрахунках витрат енергії можна не враховувати. Надлишкове ковзання коліс внаслідок втрати зчеплення супроводжується додатковими втратами енергії на роботу тертя. Цим пояснюється некоррельоване з обсягами транспортної роботи збільшення енергоспоживання в окремі дні року. Робота тертя при буксуванні сягає до 20% від загального енергоспоживання на рух. При наявності умов для розвитку резонансних бокових коливань з-за звивистого руху візків періодична поперечна сила натискання реборд трамвайних коліс на бокові поверхні рейок спричиняє до бокового зносу рейок та додаткових втрат енергії на роботу тертя, яка сягає до 5% від величини роботи, що виконують двигуни під час розбігу.

Аналіз енергоефективності транспортної роботи потребує уніфікації властивостей рухомих одиниць різних видів і типів, у зв'язку з чим постає задача приведення трамвайних вагонів і тролейбусів до базової за енергоспоживанням одиниці. Витрати енергії на рух при певних умовах експлуатації визначаються множиною показників конструкції R даного типу рухомого складу:

$$\forall r_{ki} \in R_k, i = \overline{1, m}.$$

Прийнявши набір показників конструкції для рухомого складу найбільш поширеного у даному підприємстві типу за базові, набір показників для іншого типу можна

$$r_k = \frac{R_k}{R_0},$$

визначити через відповідні коефіцієнти: $r_k = \frac{R_k}{R_0}, k=1, 2, \dots, K$, якими визначається енергоспоживання базової рухомої одиниці при проходженні секції одиничної довжини. Витрати енергії k -го типу рухомого складу, незалежно від умов експлуатації, визначаються масою тари M_t , наповненням N (масою пасажирів), квадратом швидкості виходу на автоматичну характеристику повного поля V_{ax}^2 та коефіцієнтом пуску K_n , що характеризує втрати в реостатах, питомим опором рухові w_e , середньою швидкістю руху V_c , потужністю тягових двигунів P_d та потужністю споживачів енергії на власні потреби $P_{вп}$:

$$R_0 \sum_{k=1}^K r_k = \psi \cdot [M_m, N, V_{ax}^2 (1 + K_n), V_c, P_d, P_{вп}].$$

Для отримання потрібної розмірності Нм або $\text{Вт}\cdot\text{с}$ ($\text{кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}$) набір складових представляється мультиплікативною моделлю:

$$R = \prod_{i=1}^m x_i^{j_i}, \quad j_i = a, b, c, \dots, \text{ або}$$

$$R = M^a \cdot [V_{ax}^2 (1 + K_n) + \frac{2}{3} V_{\max}^2]^b \cdot w_e^c \cdot (P_z + P_{вп})^d.$$

Відображаючи простір складових на простір розмірностей вибраного базису та прирівнюючи показники степенів при однойменних розмірностях, отримаємо систему алгебраїчних рівнянь, з якої маємо:

$$R = \frac{M \cdot w_e \cdot \sqrt{[V_{ax}^2 (1 + K_n) + \frac{2}{3} V_{\max}^2]^3}}{(P_z + P_{вп})}.$$

Таким чином стає можливим розглядати парк рухомих одиниць як однорідний.

В **третьому розділі** викладено результати теоретичних досліджень статистичних характеристик складових механічної роботи під час розбігу. При випадкових, але незмінних для даної реалізації к.к.д. η , вазі тари G_t , коефіцієнті пуску K_n , постійному члені **a**, ухилі **i** та коефіцієнті **b** при квадраті швидкості у формулі основного питомого опору рухові, а також швидкості виходу на автоматичну характеристику повного поля $V_{axпп}$, робота пуску є суперпозицію постійної величини роботи A_0 , що йде на пересування тари, з сумою функцій від випадкових величин:

$$Q = A_0 + k_1 V_p^2 + k_2 S_p + k_3 N + k_4 V_p^2 S_p + k_5 V_p^2 N + k_6 S_p N + k_7 V_p^2 S_p N;$$

Ця формула утворюється з відомого рівняння механічної роботи виокремлення складових, що визначають набуття кінетичної енергії фізичної маси одиниці та її обертальних частин $(1+\gamma)$, а також втрати на опір рухові. Коефіцієнти при випадкових величинах та їх комбінаціях мають вигляд:

$$A_0 = K_n G_m \left[51(1+\gamma) V_{\text{ахпп}}^2 + \left(a+i+b \frac{V_{\text{ахпп}}^2}{2} \right) S_{\text{рп}} \right];$$

$$k_1 = 51 G_m (1+\gamma); \quad k_2 = G_m (a+i);$$

$$k_3 = 0,7 K_n \left[51 V_{\text{ахпп}}^2 + \left(a+i+b \frac{V_{\text{ахпп}}^2}{2} \right) S_{\text{рп}} \right];$$

$$k_4 = 3,57; \quad k_5 = 0,7(a+i); \quad k_6 = 0,5 G_m b; \quad k_7 = 0,035.$$

Реальні розподілення випадкових величин квадрату швидкості закінчення розбігу V_p^2 , довжини S_p та кількості пасажирів N є усіченими, для опису яких звичайно використовується бета - розподілення. З уваги на його складність та громіздкість, в роботі прийнята апроксимація нормальним із застосуванням S-розподілення Джонсона, за яким ототожнюються емпіричні процентілі з відповідними процентілями нормального розподілення та визначаються теоретичні частки даних по інтервалах розбиття варіаційних рядів. Оскільки випадкові величини складових апроксимуються нормальними розподіленнями, їх сума також є нормальною. Як це зазвичай робиться при визначенні розподілень добутоків з пар випадкових величин, наприклад x та y , введено обернені функції:

$$z = x \cdot y \rightarrow \frac{x}{w}; \quad w = \frac{1}{y}, \quad \varphi(w) = \frac{1}{w^2} \varphi\left(\frac{1}{w}\right) = x^2 \varphi(y).$$

Розподіленням добутку трьох складових знехтувано, як явно малим ($k_7 = 0,035$). Оскільки розподілення добутоків випадкових нормальних величин є теж нормальними, механічна робота постає композицією:

$$\varphi(A) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(A - \bar{A})^2}{2\sigma^2}\right),$$

(риска над символом означає математичне сподівання означеної величини):

$$\bar{A} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2 = \bar{V}_p^2 (k_1 + k_4 \bar{S}_p) + \bar{S}_p (k_2 + k_5 \bar{N}) + \bar{N} (k_3 + k_6 \bar{V}_p^2);$$

$$\sigma = \left[\sigma_{V_p^2}^2 \left(k_1^2 + k_4^2 \frac{\sigma_{S_p}}{\sigma_{V_p^2}} \right) + \sigma_{S_p}^2 \left(k_2^2 + k_5^2 \frac{\sigma_N}{\sigma_{S_p}} \right) + \sigma_N^2 \left(k_3^2 + k_6^2 \frac{\sigma_{V_p^2}}{\sigma_N} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \dot{!}$$

$\dot{!}$

$$\sigma_{V_p^2, S_p, N} = \left(k_1^2 \sigma_{V_p^2}^2 + k_2^2 \sigma_{S_p}^2 + k_3^2 \sigma_N^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$\bar{A}_1 = k_1 \bar{V}_p^2 + k_2 \bar{S}_p + k_3 \bar{N}, \quad \bar{A}_2 = k_4 \bar{V}_p^2 \bar{S}_p + k_5 \bar{S}_p \bar{N} + k_6 \bar{V}_p^2 \bar{N},$$

$$\sigma_{V_p^2, S_p, N} = \left(k_4^2 \sigma_{V_p^2} \sigma_{S_p} + k_5^2 \sigma_{S_p} \sigma_N + k_6^2 \sigma_{V_p^2} \sigma_N \right)^{\frac{1}{2}}.$$

При відомих коефіцієнтах парних кореляцій ρ залежності середніх від випадкових складових механічної роботи, що утворюють сумісне розподілення, визначаються рівняннями регресій. При відомих середній швидкості транспортного потоку V_c на конкретних вулицях та наповненні рухомих одиниць середні довжини розбігів визначатимуться рівнянням:

$$S_p = \alpha + \beta V^2 + \gamma N, \quad \alpha = \bar{S}_p - \rho_{V_p^2, S_p} \frac{\sigma_{S_p}}{\sigma_{V_p^2}} \bar{V}_p^2 - \rho_{N, S_p} \frac{\sigma_{S_p}}{\sigma_N} \bar{N}; \quad \beta = \rho_{V_p^2, S_p} \frac{\sigma_{S_p}}{\sigma_{V_p^2}}; \quad \gamma = \rho_{N, S_p} \frac{\sigma_{S_p}}{\sigma_N}.$$

У звичайних умовах експлуатації зв'язок довжини розбігу з квадратом швидкості, наприклад, при відправленні із зупинки, має вигляд:

$$S_p = V_c^2 \left(1 + \frac{0,07 N_{\text{пас.}}}{G_m} \right) - 60.$$

Залежності випадкових значень механічної роботи від випадкових значень складових, згідно з центральною граничною теоремою, спрямовуються до залежностей від математичних сподівань цих складових, тобто до залежностей середніх. Таким чином можна визначити статистичні характеристики розподілення механічної роботи за коефіцієнтами регресій.

Визначення енергоефективності потребує знання обсягів пасажироперевезень P та середніх дальностей поїздок по маршрутах. У зв'язку з цим обгрунтовано і розроблено практичну методику визначення середньої дальності поїздки. Пасажироперевезення протягом рейса може бути представлене послідовністю проходження перегонів та перебувань на j , $0 \leq j \leq k-1$ зупинках, на яких сідає по m_j та виходить по n_i пасажирів.

Позначивши через $L_{01}, L_{12}, \dots, L_{(k-1)k}$ довжини перегонів та помножуючи їх на відповідні наповнення, можна знайти пасажироперевезення по перегонах, а підсумувавши добутки – пасажироперевезення одної рухомої одиниці за рейс в цілому:

$$P = \sum_{0 \leq j \leq k}^{m-1} \left[n_j \sum_{q=j}^{m-1} L_{q, q+1} - \left(n_{j, j+1} \sum_{i=j+1}^{m-1} L_{i, i+1} \right) \right].$$

Звідси середня довжина поїздки:

$$L_c = P \left(\sum_{j=0}^{k-1} n_j \right)^{-1}$$

Обсяг пасажироперевезень протягом рейса може бути представлений добутком середнього наповнення рухомої одиниці P_c на довжину рейса L_p , а також залишком d :

$$P_c = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} [(m-j)n_j - \sum_{q=j+1}^{m-1} (m-q)n_{jq}] ; \quad L_p = \sum_{j=0}^k L_{j,j+1} ;$$

$$d = \sum_{j=1}^{m-1} (n_j - \sum_{q=0}^j n_{qj}) \cdot \left[\frac{m-j}{m} - \frac{(m-j)\bar{L} + \sum_{j=1}^{k-1} l_{j,j+1}}{m\bar{L}} \right]$$

При цьому довжини перегонів визначені через середню довжину та відхилення

$$\bar{L}_n = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} L_{j,j+1},$$

$$l_{j,j+1} = L_{j,j+1} - \bar{L}_n$$

$$0 \leq j \leq m-1$$

Залишок d є коваріацією між кількостями пасажирів з груп n_j , що залишилися у рухомій одиниці і їдуть по q -тому перегону, та відхиленнями довжин перегонів від середньої. Оскільки між цими випадковими величинами зв'язок відсутній, коваріація спрямовується до нуля тим швидше, чим більша кількість перегонів. Таким чином маємо просту формулу:

$$L_c = P_c \frac{\sum_{j=0}^{m-1} L_{j,j+1}}{\sum_{j=0}^{m-1} m_j},$$

(3.3)

Співставлення результатів обчислення середніх дальностей за наближеною формулою та отриманих з даних талонних обстежень вказує на їх практичне співпадання.

Четвертий розділ присвячено обґрунтуванню метода моделювання руху на довільному перегоні безпосереднім інтегруванням диференціальних рівнянь для різних режимів з використання крім першої форми відомого диференціального рівняння руху також другої і третьої форм відповідно до алгоритму, яким відтворюються умови на смузі руху і відповідні дії водія.

З огляду на необхідність подальшого інтегрування, найбільш доцільним для опису автоматичних характеристик є застосування степенного поліному. Звичайним у таких випадках є застосування поліномів Чебишева, за якими для передбачених стандартами на тягові двигуни відхилень характеристик від проектних у 4% забезпечується потрібна точність при $n=2$.

Безпосереднє використання розв'язань диференціальних рівнянь руху має певні незручності з-за наявності в них трансцендентних функцій, тому точні розв'язання апроксимовано дрібно - раціональними функціями. Наприклад, для розбігу зі сталою силою тяги F_n на ділянці з незмінним ухилом i диференціальне рівняння руху має вигляд:

$$\frac{dV}{dt} + f(V^2 + h) = 0 ; \quad f = \frac{b}{102(1+\gamma)} ; \quad h = \frac{F_{\Pi} - G(a+i)}{Gb} ; \quad G = G_T + G_{\Pi},$$

де G_T, G_P – вага тари та пасажирів; $(1+\gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових частин рухомого складу; a, b – коефіцієнти питомого основного опору рухові. Інтегрування цього рівняння дає:

$$V = \alpha th \left(\alpha ft + \operatorname{arth} \frac{V_n}{\alpha} \right); \quad S = \frac{1}{f} \ln \frac{\operatorname{ch} \left(\alpha ft + \operatorname{arth} \frac{V_n}{\alpha} \right)}{\operatorname{ch} \operatorname{arth} \frac{V_n}{\alpha}}. \quad \text{і}$$

Виконавши за відомими правилами розкладання експонент до другого члена, отримаємо апроксимаційні формули швидкості, пройденого шляху та часу:

$$V = V_n - fht; \quad S = V_n t - \frac{fh}{2} t^2; \quad t = \frac{V_n - V}{fh}; \quad S = \frac{V_n^2 - V^2}{2fh}; \quad V = \sqrt{V_n^2 - 2fhS}.$$

Цим же порядком утворюються наближені розв'язання для ослаблення поля, вибігу, руху на автоматичних характеристиках, гальмування.

Наявність змінного по довжині додаткового опору дещо ускладнює розв'язання, бо крім функції швидкості в правій частині рівняння з'являється інтеграл:

$$\frac{dV}{dt} = F[(V, V^2)t] + k \int_0^t V(t) dt.$$

Застосовуючи належну заміну змінних, можна привести таке рівняння до виду рівняння із змінними, що розділяються, і розв'язувати його звичайними методами з наступною апроксимацією. Наприклад, для вибігу трамвайного вагону в перехідній до кругової з радіусом $R_{к.к.}$ та довжиною $L_{п.кр.}$ кривій:

$$\frac{VdV}{dS} + f(V^2 + h_g) + k_{н.кр.} S = 0; \quad k_{н.кр.} = \frac{450}{R_{к.к.} \cdot L_{п.кр.} \cdot 102(1 + \lambda + \gamma) G_m},$$

результатом буде розв'язання для прямої плюс додаток:

$$V^2 = V_n^2 - 2fh_g S - k_{н.кр.} S^2.$$

Застосовуючи лінійні регресії довжин розбігу та гальмування по квадрату середньої швидкості транспортного потоку в середній частині перегону, криву руху можна замінити спрощеною, еквівалентною за витратами енергії, трапецеїдальною діаграмою. Прирошення кінетичної енергії в тяговому режимі на інтервалі швидкостей дорівнює роботі з подолання опору рухові на наступному слідом за тяговим режимом вибігу у тому ж інтервалі швидкостей. Заміна кривих розбігу і гальмування відтинками похилих прямих, та вибігів і повторних пусків горизонтальними лініями на рівнях квадратів середніх швидкостей спрощує обчислення механічної роботи:

$$A = (1 + \lambda) G_m \left\{ \sum_{j=1}^J V_{cj}^2 \left[51 \frac{1 + \gamma + \lambda}{1 + \lambda} + \frac{b}{2} (2S_{j+1} + S_j) \right] + a \sum_{j=1}^J (S_{j+1} + S_j) \right\} + K_n \left[51 \frac{1 + \gamma + \lambda}{1 + \lambda} V_{ахпп}^2 + aS_{pn} \right].$$

Спрощені діаграми зокрема дозволяють швидко аналізувати причини неоднакового енергоспоживання по районах живлення.

П'ятий розділ присвячено обґрунтуванню енергозощаджуючих прийомів керування рухомою одиницею на перегоні. Оскільки можливості підвищення прискорення в умовах експлуатації обмежені, реальним шляхом енергозощадження є раціональна стратегія керування одиницею в середній частині перегону.

Так, при швидкості розбігу $V_p=10$ м/с збільшення швидкості початку гальмування з 9 до 10 м/с потребує зростання інтервалу швидкостей повторного пуску з 8,63... 11,16 до 8,67...11,64 м/с. Це, на перший погляд, невелике (приблизно на 0,4%) збільшення інтервалу швидкостей повторного пуску дає зростання механічної роботи з $5,314 \cdot 10^5$ Нм до $6,693 \cdot 10^5$ Нм, або на 25%. Взаємопов'язаність швидкостей закінчення розбігу, початку гальмування та закінчення повторного пуску при заданому часі проходження перегону обумовлює зворотну залежність витрат енергії на рух від середньої швидкості у другій зоні: при зменшенні V_c витрати енергії збільшуються. Так, при зменшенні середньої швидкості з 10,67 до 9,79 м/с, тобто на 8%, витрати енергії зростають з $1,304$ до $1,371 \cdot 10^6$ Втс, або на 5% тому, що прирощення швидкості під час повторного пуску для меншої середньої швидкості повинно бути більше, ніж для більшої. При заданій швидкості початку гальмування менша середня швидкість в середній частині перегону досягається зниженням швидкості закінчення розбігу, але відповідне зменшення витрат енергії у першій зоні не компенсується перевитратами її під час повторного пуску.

У **шостому розділі** розглянуто основні напрямки енергозбереження шляхом удосконалення організації експлуатації та поліпшення умов реалізації руху по районах живлення та в цілому по місту. Розробці заходів з енергозбереження повинен передувати аналіз складових енергоспоживання, серед яких потрібно виокремити складову, що визначається постійним комплексом умов реалізації руху і на яку будуть спрямовані ці заходи. В першу чергу це стосується довжин перегонів, перегляду кількостей та дислокації зупинок, розташування відносно зупинок факторів, що обумовлюють необхідність вмикань тягових двигунів. Зменшення енергоспоживання при виконанні заданого обсягу пасажироперевезень може бути досягнуто за рахунок додержання відповідності обсягу транспортної роботи попиту на транспортні послуги, зокрема за рахунок удосконалення наряду на випуск та розкладів руху, виключення переповнення рухомих одиниць, раціонального співвідношення між кількостями рухомих одиниць підвищеної місткості та звичайних трамвайних вагонів і тролейбусів.

Основними, що утворюють постійний комплекс, додатками до середнього енергоспоживання, є: втрата енергії в системі електропостачання, нерівномірність наповнення та довколишня температура. Питомі, на одиницю транспортної роботи приведені за енергоспоживанням одиниць \hat{e}_q по $q=1,2,\dots,12$ місяцях представляються аддитивними моделями:

$$\hat{e}_q = \bar{e} + \pi_R \cdot k_{Rq} + \pi_n k_{nq} + \pi_\tau k_{\tau q};$$

$$k_{Rq} = \frac{(\Delta Q_q)^2}{\frac{1}{12} \sum_{q=1}^{12} (\Delta Q_q)^2} - 1; \quad k_{nq} = \frac{\Pi_q \cdot \Delta \bar{L}}{\bar{\Pi} \cdot \Delta L_q} - 1; \quad k_{\tau q} = 1 - \frac{\tau_q}{\bar{\tau}},$$

в яких дія перелічених факторів визначається відношеннями до середніх за рік обсягів енергії ΔQ , перевезень Π , пробігів L та температур τ . Вагові коефіцієнти π встановлюються з рівняння:

$$K = (M^T M)^{-1} M^T D,$$

де M - матриця значень факторів, D - матриця фактичних питомих енергоспоживань. З використанням коефіцієнтів приведення встановлюються оцінки витрат електроенергії на рух для різних видів і типів рухомого складу по місяцях року, далі підраховуються додаткові до найменших електричні втрати, перевитрати енергії з-за переповнення рухомих одиниць та додаткові сезонні витрати енергії, обумовлені збільшенням тривалості освітлення, збільшенням опору рухові при низьких температурах, буксуваннями, роботою електроопалення тощо. По кількостям перевезених пасажирів, по середнім дальностям поїздок та швидкостям сполучення встановлюються витрати енергії на одиницю транспортних послуг з оцінкою часток додаткових витрат.

Співставлення графіків змін протягом року питомого енергоспоживання на одиницю транспортної роботи, на одного перевезеного пасажирів та на одиницю транспортних послуг дає змогу усвідомити вибір стратегії енергозбереження - при великих обсягах транспортної роботи і порівняно невеликих обсягах наданих транспортних послуг та доходів від перевезень, що опосередковано вказує на недосконалість організації експлуатації, головним напрямком є перегляд нарядів на випуск; збільшення енергоспоживання на одиницю транспортної роботи при одночасному збільшенні витрат енергії на одиницю транспортних послуг означає перерозподіл пасажиропотоків і необхідність удосконалення маршрутної системи тощо.

За годину пік обсяг пасажироперевезень на i -му маршруті $R_i^{<п\i k>}$ залежить від середньої дальності поїздки $L_{c(i)}$, пробігу рухомих одиниць $S_i^{<п\i k>}$ та наповнення, яке визначається місткістю B та коефіцієнтом використання місткості на маршруті $\eta_i^{<п\i k>}$, а пробіг залежить від кількості одиниць в русі $N_i^{<п\i k>}$, довжини маршруту L_i та експлуатаційної швидкості $V_{e(i)}$:

$$R_i^{<п\i k>} = \frac{1}{L_{c(i)}} B \eta_i^{<п\i k>} S_i^{<п\i k>}, \quad S_i^{<п\i k>} = N_i^{<п\i k>} V_{e(i)}.$$

Такі ж самі співвідношення мають місце у міжпіковій (мп) періоди. Кількість випусків у години пік та міжпиковий період залежно від обсягів перевезень та коефіцієнта використання місткості, при $\eta_i^{<п\i k>}=1$, розраховуються з умови додержання критерію:

$$(N_i^{<п\i k>} / N_i^{<м\i n>}) = \eta_i^{<м\i n>} (R_i^{<п\i k>} / R_i^{<м\i n>}).$$

Наприклад, якщо у трамвайному депо з плановою кількістю випуску у будні дні 50 поїздів - 7 розривних, 4 скорочених, 15 дванадцятигодинних, 4 однозмінних та 4 нічних випусків, що дає

$$\eta^{<м\i п>} = 0,44,$$

змінити співвідношення між видами випусків до 20 двозмінних, 25 розривних та 5 оглядових, то можливо збільшити кількість одиниць в русі у періоди масових перевезень на 26,6% і зменшити на 11% кількість вагонів у міжпиковий період, що дасть зростання коефіцієнта

використання місткості на 14%: $\eta^{<м\i п(н\i о\i в\i е)>} = 0,62$. Аналогічні результати досягаються перевідрядженнями рухомих одиниць з кінцевих станцій на інші маршрути з урахуванням неспівпадання в часі максимумів попиту на окремих ділянках. Як свідчать розрахунки, при наявності інтервалу між максимумами попиту на суміжних ділянках, співрозмірних з тривалістю рейса можлива економія кількості випусків за рахунок перевідряджень складає від 10 до 25% залежно від пасажиропотоку. Суттєвого ефекту слід очікувати при розведенні часу початку роботи підприємств і організацій по ділянках маршрутної системи.

При механічному зменшенні кількості одиниць в русі відбувається збільшення їх маси з-за підвищення наповнення. Це викликає збільшення питомого енергоспоживання, яке може випереджати ефект економії енергії від зменшення кількості одиниць в русі. Гранічною умовою, що визначає можливість зменшення витрат енергії за рахунок скорочення кількості рухомих одиниць на маршрутах від n до n' при збереженні інших умов експлуатації є додержання нерівності: $n' \geq \lambda^2 n$, $n' \leq n$.

Більш ефективним засобом енергозаощадження є заміна (з часткою v) одного типу на інший підвищеної місткості, оцінюваною коефіцієнтом k_m . При цьому зменшення енергоспоживання до $Q'_{m(p)}$ з-за зменшення загальної кількості рухомих одиниць відносно попереднього $Q_{m(p)}$ випереджає ефект збільшення витрат енергії з-за підвищеної потужності ($k_e > 1$) рухомих одиниць більшої місткості:

$$\frac{Q'_{m(p)}}{Q_{m(p)}} = 1 + v \left(k_e \frac{1 - v(k_m - 1)}{k_m(1 - v + k_m)} - 1 \right).$$

Так, заміна половини ($v=0,5$) тролейбусів ЗіУ-9 на трьохосні тролейбуси Т-1 з підвищеною на

42,7% місткістю та збільшеним на 24,4% питомим енергоспоживанням дає: $\frac{Q_{m(p)'} }{Q_{m(p)}} = 0,828$, тобто економія енергії складатиме 17,2%.

Важливим напрямком енергозбереження є удосконалення умов реалізації руху, яке перш за все передбачає їх формалізацію. Якщо впродовж j – ої секції, яка живить d перегонів, розташовано p факторів, що обумовлюють необхідність переходу на тяговий режим, то умови експлуатації для кожної одиниці на цій секції утворюють множину $\forall u_{jp} \in U_{j,p=1,d}$, а надавши ваговий коефіцієнт кожному з факторів та підсумовуючи коефіцієнти по перегону, матимемо об'єктивну числову характеристику умов експлуатації по конкретних перегонах. Числові показники умов руху в тій частині, що стосуються розбігів, визначаються за допомогою спрощених діаграм, на яких відображається взаємне розташування спеціальних частин, поворотів та світлофорів (з імовірностями зеленого вогню) на перегонах, а також їх віддалення від зупинок.

Ефективним заходом енергозбереження є ліквідація - повна, або на певні періоди доби - зупинок з малим пасажирообігом. При цьому довжини нових перегонів не повинні перевищувати оптимальні, визначені з урахуванням середньої довжини поїздки L_c та тривалості чекання на зупинках t_3 :

$$L_{om.} = 0,365 \sqrt{L_c t_3}.$$

Внаслідок різноспрямованості цього заходу на енергоспоживання – економії енергії на розбіги з одного боку, та збільшення роботи з подолання опору рухові з другого – зменшення кількості зупинок n_m у середньому на 10% дає приблизно 5,6% економії енергії, і при проведенні прогнозних розрахунків можливої економії електроенергії на маршруті за рахунок зменшення кількості зупинок, рекомендовано користуватися формулою:

$$e'_m = e_m \left(1 - 0,56 \frac{n_m - n'_m}{n_m} \right).$$

Іншим засобом зменшення витрат енергії є раціоналізація розташування факторів, що обумовлюють необхідність вмикання тягових двигунів вздовж перегону. Так, перенесення повітряних стрілок, які раніше були за 70 м до світлофора, за 10 м від стоп - лінії дає економію енергії на 17%. Якщо пік інтенсивності транспортного потоку з другорядної дороги припадає на період зниження перевезень міським електротранспортом, встановлений на перехресті світлофор в годину пік необхідно перевести на блимаючий режим. Ефективність подібних пропозицій оцінюється співставленням діаграм руху при існуючій ситуації та при запропонованих змінах з подальшими обчисленнями механічного еквіваленту витрат енергії за існуючого та запропонованого розташування факторів, що змушують робити додаткові пуски.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми створення наукових основ енергозберігаючої технології експлуатації трамвайних вагонів та тролейбусів, що виявляється у встановленні раніше не дослідженого зв'язку витрат енергії на рух з комплексом умов реалізації транспортної роботи як основи аналізу складових енерговитратності перевезень та розробки заходів з енергозбереження.

Використання результатів вирішених у дисертації задач дозволяє, залежно від конкретних на даному транспортному підприємстві умов реалізації руху, стану основних фондів та перспектив їх оновлення, визначати пріоритетність напрямків енергозаощаджуючої експлуатації:

- заміною рухомого складу з реостатним регулюванням на рухомі одиниці з електронними перетворювачами;
- удосконаленням організації експлуатації та умов руху;

- навчанням водіїв енергозберігаючим прийомам керування рухомими одиницями та організацією контролю за їх дотриманням.

Теоретичні і методичні розробки дисертаційної роботи можуть бути використані при створенні методичного забезпечення учбових планів ІППК та ФПК.

На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Існуючий показник витрат енергії на тоннокілометр не стимулює до створення енергоефективних транспортних засобів, зокрема зі зменшеною вагою тари, та не спрямовує на енергозаощадження при експлуатації. Нормування витрат енергії повинно базуватися на затверджених для різних видів і типів нормативах енергоспоживання порожніх рухомих одиниць на умовному перегоні з наступним перерахунком до умов експлуатації на конкретних підприємствах. Для об'єктивного аналізу енергоефективності пасажироперевезень рекомендовано впровадження показників:

- питомих витрат енергії на одиницю транспортних послуг - для оцінки енергоефективності пасажироперевезень;
- показника питомих витрат енергії на одиницю транспортної роботи - для планування обсягів електроенергії;
- показника комерційної енергоефективності перевезень - для порівняння рентабельності окремих маршрутів.

2. Експлуатація засобів міського електротранспорту являє собою процес функціонування системи, в якій властивості конструкції рухомих одиниць, умови реалізації руху та способи керування одиницями складають функцію перетворення попиту на транспортні послуги до пасажироперевезень і витрат енергії. Норми витрат енергії запропоновано визначати перерахунком до конкретних умов експлуатації затвердженого нормативу енергоспоживання порожньої рухомої одиниці на умовному перегоні.

3. Питома вага динамічних процесів у тягових передачах та екіпажних частинах рухомих одиниць у витратах енергії на рух залежить від виду динамічного навантаження. Крутильні коливання у системах тягового приводу та коливання кузовів практично не впливають на показники енергоспоживання - втрати потужності при резонансах не перевищують 1,5 - 2%. Релаксаційні автоколивання колісних центрів трамвайних вагонів при перевершенні критичних швидкостей обумовлює збільшення питомого опору рухові на 15% з відповідним зростанням витрат енергії на рух, при резонансах бокових коливань від звивистого руху візків додаткова робота з подолання опору рухові складає до 8%. Найбільші втрати енергії (до 150% від роботи на пересування рухомої одиниці) мають місце при буксуванні, у зв'язку з чим систему захисту від надмірного ковзання слід розглядати як засіб енергозаощадження.

4. Для приведення рухомих одиниць різних видів і типів до базової за енергоспоживанням по інваріантним щодо умов експлуатації наборам показників конструкції рухомого складу слід використовувати методи теорії розмірностей. Приведення одиниць дає змогу розглядати інвентар даного підприємства як однорідний.

5. Випадкові величини квадратів швидкості закінчення розбігу, довжин ділянок розбігу та наповнення, що визначають механічну роботу розбігу, утворюють тримірні нормальні розподілення на кожному перегоні. Отримано параметри розподілень та регресій, які повинно використовувати при розрахунках витрат енергії. Середню дальність поїздки запропоновано визначати з застосуванням матеріалів традиційних для міського електротранспорту обстежень шляхом ділення на наповнення суми добутків довжин перегонів на кількості пасажирів, що входять до рухомих одиниць на зупинках протягом рейса. Експериментально встановлена похибка цього методу не перевищує 5%, що дозволяє оцінювати комерційну енергоефективність експлуатації та прогнозувати економічну ефективність заходів з енергозбереження.

6. На підставі апроксимації трансцендентних функцій алгебраїчними співвідношеннями визначені прийнятні для практики формули математичного моделювання руху на довільному перегоні з випадковим або детермінованим чергуванням режимів руху для обчислення механічного еквіваленту витрат енергії забезпечує співпадання з результатами точних розв'язань з похибкою не вище 3%. Моделювання руху дозволяє перейти до прогнозування витрат енергії при будь-яких

змінах умов експлуатації завдяки можливості одноопераційного обчислення кінцевих значень параметрів руху по заданим вихідним. Побудова спрощених трапецеїдальних діаграм руху на довільному перегоні дозволяє виконувати експресні розрахунки механічної роботи при проходженні заданого перегону з точністю до 7%.

7. Мінімум механічної роботи при проходженні перегону досягається при мінімумі відхилення від середнього граничних значень швидкостей повторних пусків та вибігів. Рекомендовано керуватися цим положенням при навчанні водіїв енергозберігаючому керуванню рухомою одиницею на конкретних перегонах. При заданих швидкостях закінчення розбігу та початку службового гальмування і однаковому часі проходження середньої частини перегону використання проміжних позицій ослаблення поля призводить до зменшення витрат енергії, незважаючи на збільшення шляху повторного пуску порівняно з повторним пуском при кінцевому ослабленні. Надолуження запізнь доцільно провадити за рахунок збільшення швидкості закінчення розбігу при реалізації найменшої за даних умов швидкості початку гальмування - зниження швидкості початку гальмування на 12% за умови реалізації заданого часу проходження перегону дає економію енергії у 15%.

8. Перехід від словесного визначення чинників, що обумовлюють послідовність та тривалість режимів при проходженні перегону, до числових критеріїв, за якими умови руху на будь-якому перегоні визначаються певним числом, повинно здійснювати за даними спрощених трапецеїдальних діаграм руху.

9. Впровадженню енергозберігаючої технології експлуатації міського електротранспорту повинен передувати аналіз складових енергоспоживання в цілому по місту, по районах живлення та по маршрутах. Питоме, на одиницю транспортної роботи, енергоспоживання визначається з матричного рівняння, розв'язання якого являє собою суму постійного члена, що характеризує властивості рухомої одиниці і сталий комплекс умов експлуатації, та додатків, які обумовлені періодичними (пора року, попит на перевезення) та випадковими відхиленнями умов експлуатації від незмінного протягом року комплексу цих умов як по підприємству в цілому, так і по окремих районах живлення. Встановлення цього зв'язку є необхідною передумовою розділення спожитої на рух енергії по маршрутах для складання енергетичних паспортів і оцінки енергетичної рентабельності.

10. За рахунок удосконалення наряду на випуск, застосування перевідряджень рухомих одиниць, раціонального співвідношення кількостей рухомих одиниць звичайної та підвищеної місткості у складі випуску при припустимому скороченні випуску і дотриманні граничного інтервалу руху на маршруті витрати енергії можуть бути зменшені у середньому на 10%.

11. Виконання заданого обсягу пасажироперевезень зменшеною кількістю рухомого складу при удосконаленні умов експлуатації вздовж маршруту – повної або на певні години доби ліквідації зупинок з малим пасажирооборотом, раціонального розташування спеціальних частин відносно зупинок та світлофорів, раціонального режиму чергування та тривалостей фаз світлофорів - дає можливість заощаджувати від 5 до 15% електроенергії. Впровадження енергозберігаючої технології експлуатації, крім зменшення експлуатаційного енергоспоживання, дає можливість створити базу помаршрутного нормування, що є неодмінною передумовою широкого застосування засобів індивідуального обліку витрат енергії кожною рухомою одиницею.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Л.М. Шутенко, В.Т. Семенов, Г.В. Ковалевський, В.І. Титяєв, Е.І. Карпушин, О.О. Великих, В.М. Тимошенко, В.О. Ткачов. Концепція комплексного соціально-економічного розвитку м. Харкова до 2010 р. //Коммунальное хозяйство городов. Выпуск 24. - К.: Техніка. - 2000.- С. 3 - 43.
2. Карпушин Е.І. Реформування системи життєзабезпечення міста. // Збірник наукових праць Української Академії державного управління при Президентові України. Випуск 1/2001 "Державне управління та самоврядування". Частина 4. Харків: УАДУ ХФ. - 2001. - С. 43-46

3. Карпушин Е.І. Обґрунтування показника та нормативу експлуатаційних витрат енергії на міському електротранспорті. //Коммунальное хозяйство городов. Выпуск 27. - К.: Техніка. - 2001. - С. 241 - 247.
4. Карпушин Е.І. Статистична модель енергоспоживання рухомими одиницями міського електротранспорту //Вестник харьковского государственного политехнического университета. - Харків: ХГПУ. - 2000. - № 82. - С.83-85.
5. Карпушин Э. И. Ресурсосберегающая организация эксплуатации подвижного состава городского электрического транспорта //Проблемы и перспективы ресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве. - Харьков: ХИИГХ. - 1995.- С. 11 – 12.
6. Карпушин Э. И. Расход энергии на движение как макрофункция факторов условий эксплуатации. //Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. - Харьков: ХИИГХ. - 1996. - С. 5 – 6.
7. Карпушин Э.И., Гусев М.В. Математическая модель энергопотребления городским электротранспортом //Коммунальное хозяйство городов - К.: Техніка. - 1997. - С. 122 – 124.
8. Карпушин Э.И. Автоколебания подрезиненных колес трамвайных вагонов как фактор увеличения энергопотребления //Коммунальное хозяйство городов. - К.: Техніка. - 1997. - С.112 – 113.
9. Карпушин Э.И. Оптимальный режим движения на простом перегоне // Коммунальное хозяйство городов. - К.: Техніка. - 1998. - С.43 – 48.
10. Карпушин Э. И. Применение метода динамического программирования при моделировании движения подвижной единицы на перегоне // Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства.- К.: ІСДО. - 1994. - С.33
11. Карпушин Е.І. Аналітичне моделювання руху на міському електротранспорті //Коммунальное хозяйство городов. Выпуск 23. К.: Техніка - 2000. - С. 198 - 204.
12. Карпушин Э. И. Использование управления в функции скорости городского электротранспорта //Коммунальное хозяйство городов - К.: Техніка. - 1994. - С.120 – 122.
13. Карпушин Е.І. Першочергові заходи з економії енергії на міському електротранспорті. //Інформаційні технології на транспорті: стан справ та основні напрямки розвитку (збірник статей). К.: УТУ. - 1998. - С. 70 - 73.
14. Карпушин Е.І. Енергозаощаджуваче керування при русі на простому перегоні // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті №6(27). - Харків: ХарДАЗТ -2000. - С. 75 - 76.
15. Карпушин Е.І. Можливості енергозаощадження вибором жорсткості тягової характеристики ослабленого поля при русі в середній частині перегону // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті №1 (28). Харків: ХарДАЗТ - 2001. С. 83 - 85.
16. Карпушин Е.І. Енергозаощадження на міському електротранспорті за рахунок удосконалення організації експлуатації. //Коммунальное хозяйство городов. Выпуск 28. - К.: Техніка. -2000. - С.216 - 223.
17. Карпушин Е.І. Моделювання службового гальмування рухомої одиниці маршрутного транспорту при випадкових початкових умовах //Системи обробки інформації . Выпуск 1 (11). Х.: - ХФВ "Транспорт України", 2001. - С. 141 - 144.
18. Карпушин Е.І. Визначення експлуатаційних витрат енергії рухомим складом трамвая і тролейбуса з застосуванням нечітких множин при моделюванні руху.// Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті № 2 (23). Харків: ХарДАЗТ. - 2000. - С. 48 - 50.
19. Далека В.Д., Карпушин Е.І. Перевідрядження рухомих одиниць як засіб енергозаощадження при експлуатації транспортної системи. // Вестник Национального Технического Университета "Харьковский Политехнический Институт". Харків: НТУ "ХПІ".- 2000. -№ 144. - С. 27 - 29.
20. Будніченко В.Б, Далека В.Х., Карпушин Е.І., Хворост М.В. Планування потреби в електроенергії на експлуатацію міського електротранспорту за узагальненими статистичними даними // Комунальне господарство міст, вип. 30. - К.: Техніка. - 2001. - С. 249 - 254.
21. Карпушин Э.И., Билибин Г.Г., Ключко В.М., Голендер В.А., Нем В.К., Кульбашный В.А. Распределение скоростей движения трамвайных вагонов //Наука и техника в городском хозяйстве, вып.39 - К.: Будівельник. - 1978. - С.64 - 68.

22. Омельченко Е.М., Блинкин С.С., Билибин Г.Г., Карпушин Э.И. О методике расчета системы электроснабжения городского электрического транспорта // Наука и техника в городском хозяйстве, выпуск 13. К.: Будівельник. - 1970. - С. 48 - 55.
23. Карпушин Э.И., Голендер В.А., Максимов А.Н. Оценка динамических качеств крутильных систем тяговых передач трамвайных вагонов.// Научные труды Академии коммунального хозяйства, вып.137. - М.: ОНТИ АКХ. - 1976. - С.3 - 11.
24. Карпушин Э.И., Стернин И.П. Применение параметрических моделей для построения кепстров в задачах вибродиагностики редукторных механизмов. //Точность и надежность механических систем. Стохастическая локализация врожденности. Сборник научных трудов. - Рига: Риж. политехн. ин -т, 1983. - С. 62 - 67.
25. Карпушин Э.И., Ярох Н.В. Определение вертикальных жесткостей рессор центрального подвешивания трамвайных вагонов. //Наука и техника в городском хозяйстве, вып. 54. - К.: Будівельник. - 1983. - С. 77 -78.
26. Карпушин Э.И., Стернин И.П. Лыски на бандажах трамвайных вагонов и их диагностирование //Наука и техника в городском хозяйстве, в. 51. - К.: Будівельник. - 1982. - С. 59 - 64.
27. Карпушин Э.И., Безлуцкий Ю.Б. Определение контактных напряжений в контакте бандажа трамвайного вагона с рельсом при различных профилях. // Повышение качества и надежности городского хозяйства. - К.: - УМК ВО МВССО УССР. - 1990. - С.127 -131.
28. Карпушин Е.И., Дудко В.Ф., Бакуменко В.Г., Голендер В.А. Применение бесконтактной передачи информации при тензометрировании деталей подвижного состава. // Наука и техника в городском хозяйстве, вып. 42.- К.: Будівельник. - 1979. - С. 98 - 100
29. Карпушин Э.И. Ресурсосберегающая организация эксплуатации подвижного состава городского электрического транспорта // Тезисы докладов на Международной научно - практической конференции " Проблемы и перспективы ресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве" - Харьков: ХГАХ - 1995. - С. 38.
30. Карпушин Э. И. Расход энергии на движение как макрофункция факторов условий эксплуатации. // Тезисы докладов на 28 научно-технической конференции Харьковской государственной академии городского хозяйства. Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. - Харьков: ХГАГХ. -1996. С.5 – 6.
31. Карпушин Э.И. Расход электроэнергии на городском электротранспорте //Тезисы докладов на 29 научно-технической конференции Харьковской государственной академии городского хозяйства - Харьков: ХГАГХ. - 1998. С. 8 – 9.
32. Карпушин Е.И. Энергозбереження при експлуатації міського електротранспорту // Тези доповідей на міжнародному семінарі " Сучасні системи управління муніципальними послугами" - Рада Європи, Асоціація міст України - Харків: Рада Європи, Асоціація міст України. - 1999. - С.33 - 35.

Анотація

Дисертація присвячена дослідженню залежностей енергоефективності перевезень на базі лінійної системи вхід - вихідних співвідношень, і аналізу складових експлуатаційного енергоспоживання на міському транспорті для обґрунтування заходів з енергозбереження з прогнозованими результатами. В дисертації розроблено новий напрямок проблеми енергозаощадження - створення наукових основ технології експлуатації засобів міського транспорту (трамвайних вагонів та тролейбусів), яка ґрунтується на представленні експлуатації функціонуванням системи, в якій властивості конструкції рухомих одиниць, способи керування ними та умови реалізації руху складають загальну передаточну функцію перетворення входу - попиту на транспортні послуги - до пасажироперевезень і цілеспрямовано мінімізованих витрат енергії на рух. Запропоновано моделювання руху на довільному перегоні, формалізацію умов експлуатації, обґрунтовано прийоми енергозаощаджуючого керування рухомою одиницею та заходи з енергозбереження за рахунок раціональних змін умов реалізації руху по перегонах та удосконалення організації експлуатації.

Ключові слова: експлуатація міського електротранспорту, рухомий склад, витрати енергії на рух, умови експлуатації, енергозбереження.

Аннотація

Карпушин Э.И. Научные основы энергосберегающей технологии эксплуатации средств городского транспорта. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 - эксплуатация и ремонт транспортных средств. - Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2001.

В диссертации разработано новое направление проблемы энергосбережения - создание научных основ технологии эксплуатации городского электротранспорта, базирующейся на представлении эксплуатации функционированием системы, в которой показатели конструкции подвижных единиц, способы управления ими и условия реализации движения образуют передаточную функцию преобразования входа - спроса на транспортные услуги - в пассажироперевозки и целенаправленно минимизируемый расход энергии на движение. Связь энергопотребления с объемами транспортной работы рассмотрена в комплексе условий эксплуатации как в целом по маршрутной системе, так и по отдельным маршрутам, районам питания и при конкретных условиях реализации движения на перегонах, что дает возможность анализировать составляющие расхода энергии отдельной подвижной единицы, их совокупностей на секциях и по районам питания, на отдельных маршрутах и в целом по городу для обоснования и внедрения мероприятий по энергосбережению. Теоретически обоснованы и разработаны метод моделирования движения на произвольном перегоне с применением трех форм аналитических решений дифференциальных уравнений движения для различных режимов, процедура формализации условий эксплуатации на базе трапецеидальных диаграмм движения, исследованы зависимости, обеспечивающие энергосберегающее управление подвижной единицей. На базе модели вход - выходных соотношений обоснованы пути сокращения расхода энергии на движение за счет организационных мероприятий - совершенствованием наряда на выпуск, перекомандированием части подвижных единиц с маршрута на маршрут, изменением соотношения между количествами единиц нормальной и повышенной вместимости. Установлены причины перерасхода энергии при механическом сокращении выпуска. Доказана целесообразность и эффективность энергосбережения за счет совершенствования условий движения на перегонах путем совмещения факторов, определяющих необходимость торможений с последующими разгонами, сокращения - полного или на период массовых перевозок - количества малопродуктивных остановок, изменения режимов работы светофоров.

Ключевые слова: эксплуатация городского электротранспорта, подвижной состав, условия эксплуатации, расход энергии на движение, условия эксплуатации, экономия энергии.

The summary

Karpushin E. I. Scientific base of a maintenance technology for means of a urban transport, which provides energy economies. - Manuscript.

Thesis for a doctor's degree by specialty 05.22.20 - maintenance and repair by transport means. - Kharkov state academy of a railway transport, Kharkov, 2001.

The dissertation is devoted to definition of relations by transportation's power efficiency, who basically on the linear systems an input - initial ratio and analysis of addends to operational power consumption on the urban electrotransport for the substantiation of measures on energy economies with forecasting of consequences.

Is developed the new scientific direction in a problem by economies of energy - creation a system of scientific positions by the technology of maintenance with a smaller power consumption, that is grounded on performance of energy consumption's by outcome of a system operation, in which one power properties of a design a mobile units, conditions of implementation of motion and the ways of units control, will derivative a general transfer transformation's function of demand on transportation services in transportation's by passengers and in energy consumption's on motion. The methods energetically and economical control of mobile unit and measure on decreasing a power consumption are offered simulation of motion on an arbitrary site,

formalizing of the operation conditions, at the expense of conditions improvement to implementation for motion on sites and refinement of maintenance organization.

Keywords: maintenance of the urban electrotransport, carriage rolling stock, power consumption on motion, operation conditions, economy of energy.