

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Харківський національний університет міського господарства  
імені О. М. Бекетова**

**КОЗЛОВА ОЛЬГА СЕРГІЇВНА**



УДК 621.311:656.132:656.134

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.22.09 - електротранспорт

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Харченко Віктор Федорович,**  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, МОН України,  
професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Михаліченко Павло Євгенович,**  
Херсонська філія  
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова  
завідувач кафедри автоматики та електроустаткування;

кандидат технічних наук, доцент  
**Панченко Владислав Вадимович,**  
Український державний університет залізничного транспорту  
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Захист відбудеться «5» травня 2021 р. о 14-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.089.02 Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д64.089.02 (<https://radalight.kname.edu.ua/index.php/diyalnist>)

Автореферат розісланий «1» квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В. М. Поліщук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Енергозбереження в Україні визнано головним напрямком в економічному розвитку держави. Особливо це важливо для транспортної галузі, що є досить енергоємною. Необхідність ресурсозбереження вимагає застосування енергозберігаючих режимів та технологій у всіх видах роботи транспорту. Це відноситься до експлуатаційних підприємств, що забезпечують технічне обслуговування та ремонт рухомого складу, утримання колійних споруд, систем керування рухом транспортного комплексу, а також до систем електропостачання. Для інноваційних систем управління електропостачанням міського електротранспорту (МЕТ) необхідна сучасна апаратура для аналізу витрат і втрат енергії в контактній мережі і тягових підстанціях в режимі реального часу.

Витрати на передачу і розподіл електроенергії в системі електропостачання електротранспорту залежать від тягових характеристик трамваїв і тролейбусів, формування графіків їх руху та режимів роботи системи електропостачання. Перша складова затрат мінімізується шляхом модернізації трамваїв та тролейбусів, покращення їх технічного обслуговування і створення умов оптимальних режимів роботи. Друга – за рахунок оптимізації пасажиропотоків та графіку руху трамваїв і тролейбусів (поєднання раціональних маршрутів і інтервалів руху). Третя складова витрат може бути мінімізована при збереженні якості електроенергії за рахунок підвищення енергоефективності систем електропостачання МЕТ, а саме підвищення напруги живлення тягових підстанцій, використанням регульованої компенсації реактивної потужності та накопичувачів енергії, переходом на консольні схеми живлення електротягових мереж при виявленні перетоків потужності. Як свідчать дослідження, втрати електричної енергії в системах електропостачання досягають 14 % від загальних втрат, причому на тягових підстанціях 5 %, в контактній мережі 9 %.

Проблемою підвищення енергоефективності електротягових мереж і ресурсозберігаючих режимів та технологій їх експлуатації у різний час займалися вчені і фахівці науково-дослідних інститутів України, Китаю, Японії, Південної Кореї, Росії, Німеччини, Франції.

Вивченню та реалізації енергозберігаючих режимів роботи завжди приділялося багато уваги в зовнішньому та внутрішньому електропостачанні МЕТ, але зменшення як перетоків потужності, так і втрат електричної енергії під час її передачі і розподілу, потребують розгляду режимів роботи обох систем. Таким чином, вирішення питань енергозбереження на міському електротранспорті за рахунок підвищення енергоефективності режимів роботи систем зовнішнього і внутрішнього електропостачання міського електротранспорту є актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричного транспорту ХНУМГ ім. О.М. Бекетова відповідно до таких державних програм: Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р.; Комплексна програма енергозбереження в місті Харкові на 2010-2020 рр., затверджена Харківською міською радою від 22 вересня 2010 р. № 262/10; «Підвищення енергетич-

ної ефективності і економічності роботи електротягових систем» (№ ДР 0103U005112).

Дослідження в роботі пов'язані з виконанням госпдоговору з КП «Міськелектротранссервіс» (№ 3111/19 від 17.12.2019 року) «Розробка стратегії розвитку та підвищення енергоефективності міських електротягових мереж на період 2020–2035 рр.», та госпдоговірної теми «Переобладнання тролейбуса ЮМЗ для роботи в автономному режимі для міста Кривого Рога» (ДР № 0115U004790), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертації є підвищення енергоефективності роботи підприємств міського електричного транспорту за рахунок енергозберігаючих режимів та технологій в системах зовнішнього і внутрішнього електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати проблеми і процеси енергоефективності та енергозбереження систем електропостачання МЕТ та визначити основні фактори, що впливають на витрати енергоресурсів;
- удосконалити загальні методи дослідження параметрів енергоефективності, розробити шляхи визначення потенціалу енергозбереження і здійснити прогноз потреби в енергетичних ресурсах для МЕТ;
- розробити алгоритми та імітаційні моделі систем тягового електропостачання з урахуванням режимів роботи енергосистем та рухомих навантажень МЕТ;
- удосконалити методи розрахунку електротехнічних параметрів враховуючи взаємозв'язок систем внутрішнього і зовнішнього електропостачання МЕТ;
- визначити можливість використання нових науково-технічних рішень у енергозберігаючих схемах живлення, запропонувати інформаційні технології та технічні засоби для підвищення енергоефективності електропостачання.

*Об'єкт дослідження* – процеси роботи систем електропостачання міського електротранспорту.

*Предмет дослідження* – енергозберігаючі технології систем внутрішнього та зовнішнього електропостачання міського електротранспорту.

**Методи досліджень.** Теоретичною основою досліджень слугували методи системного аналізу, теорії електричної тяги, теорії графів і матричних методів розрахунку електричних мереж, регресійного аналізу, математичного моделювання режимів роботи систем електропостачання. Теоретичні розрахунки та їх обробку проведено з використанням прикладних програм. Імітаційне моделювання, методи математичної статистики використовувались для доказу адекватності математичних та імітаційних моделей систем електропостачання.

**Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:**

- вперше науково обґрунтована ефективність реалізації енергозберігаючих режимів роботи систем електропостачання міського електротранспорту, що відрізняється комплексним підходом до вирішення взаємозв'язаних задач зовнішнього та внутрішнього електропостачання.
- вперше розроблені імітаційні моделі тягового електропостачання міського електротранспорту, що відрізняються підвищеною точністю розрахунку параметрів і вибором раціональних за енергетичними показниками режимів роботи міського еле-

ктротранспорту;

- удосконалено методи визначення потенціалу енергозбереження міського електротранспорту та ефективного використання технічних засобів і енергозберігаючих технологій, що дозволяють зменшити питомі витрати енергоресурсів під час експлуатації рухомого складу;

- отримали подальший розвиток способи формування технологій енергозбереження систем внутрішнього і зовнішнього електропостачання міського електротранспорту, що дозволяють вести облік втрат електроенергії в мережах.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю постановки задач дослідження, результатами чисельних та натурних експериментів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в підвищенні енергоефективності та ресурсозбереження систем електропостачання міського електротранспорту за рахунок:

- розробки концепції науково-технічних рішень для енергосистем зовнішнього електропостачання тягових підстанцій міського електричного транспорту;

- технічних умов на електротехнічне обладнання (пересувні тягові підстанції постійного струму модульного виконання (ТУ У 27.1-33165522-047: 2015)), які погоджені службою електропостачання КП «Міськелектротранссервіс» і затверджені підприємством «ДАК-Енергетика»;

- розробки способу визначення втрат енергії в тяговій мережі на базі сучасних мікропроцесорних лічильників з функцією визначення ампер-квадрат-годин.

Результати проведених досліджень рекомендовані для подальшого впровадження українським підприємством «ДАК-Енергетика» при проектуванні та конструюванні електротехнічного обладнання, діагностичних пристроїв та програмного забезпечення модульних тягових підстанцій нового покоління з покращеними показниками надійності. Це підтверджено актами про впровадження результатів досліджень у КП «Міськелектротранссервіс», підприємстві «ДАК-Енергетика» та у навчальному процесі кафедри електричного транспорту ХНУМГ ім. О.М. Бекетова.

**Особистий внесок здобувача.** Результати дисертаційної роботи, що виноситься на захист, отримав автор самостійно та виклав у роботах [1]-[20]. Роботи [4], [6], [8], [16], [17], [20] опубліковано автором самостійно. У роботах, написаних та опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: [1] – обґрунтовано цілі економіко-математичного моделювання на МЕТ, [2, 3] – побудовані математичні моделі витрат електроенергії та розраховано мультиплікативну модель витрат електроенергії для підприємств МЕТ, [5] – виконано прогнозування витрат енергоресурсів та теплоносія для КП «ХТМ», [7] – розроблено механізм підвищення ефективності використання системи електропостачання в сучасних умовах, [9] – запропоновано підвищення показників енергоефективності неоднорідних мереж шляхом введення в роботу раціональної потужності пристроїв поперечної та подовжньої компенсації або автоматичного переходу на консольні схеми живлення тягових мереж, [10] – запропоновано методи визначення потенціалу енергозбереження на МЕТ та прогнозу потреби енергоресурсів на перспективу, [11] – запропоновані засади розвитку системи електротягових мереж МЕТ, [12] – виконано обробку статистичних даних та розрахунок показників надійності, [13] – обґрунтовано шляхи рекуперації

гальмівної енергії рухомого складу МЕТ, [14] – розглянуті особливості витрат енергоресурсів при експлуатації електротранспорту, [17, 18, 19] – проаналізовані критерії енергоефективності систем електропостачання на МЕТ, виконано обробку та аналіз статистичних даних транспортних підприємств та проаналізовано результати застосування методики прогнозування енерговитрат транспортними підприємствами.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, наукові і практичні результати, які було отримано в дисертаційній роботі, апробовано на: Міжнародній науково-практичній конференції «Сталий розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення» (2009 рік, Харків, ХДАМГ); II міжнародній науково-практичній конференції Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві (2010 рік, м. Алушта); XXXV науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і співробітників Харківської національної академії міського господарства (2010 рік, м. Харків); Міжнародній науковій конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації», Спецвипуск журналу «Технологічний аудит та резерви виробництва», № 5/1(7) з матеріалами Ч.1, Том «Енергетика та енергозаощадження. Транспортні технології.» (2012 рік, м. Харків); Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія та інфраструктура транспорту» (2018 рік, м. Харків, УкрДУЗТ); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку технічних наук у країнах ЄС та в Україні», - Польща: KuJawska Szkoła Wyższa we Włocławku (2018 рік, м. Влоцлавек); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Концепція розвитку електричного транспорту та його систем» (2020 рік, м. Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова);- XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (2020 рік, м. Дніпро).

**Публікації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи викладено в 20-и наукових працях. Серед них 12 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті – у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Index Scopus, 1 стаття – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus). 8 робіт апробаційного характеру: тези доповідей, опубліковані в матеріалах науково-технічних конференцій різних рівнів.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків, містить 29 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел (117 позицій) і 4 додатки. Загальний обсяг роботи – 183 сторінки, із них основного тексту – 145 сторінок.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, що розв'язується в дисертації, сформульовано її мета, наукова новизна і практичну цінність.

Передумовою до постановки і рішення задачі забезпечення енергозберігаючих технологій систем тягового електропостачання (СТЕ) з урахуванням режимів роботи систем зовнішнього електропостачання (СЗЕ) є праці вчених електричного транспорту: А.Т. Буркова, Л.А. Германа, Г.К. Гетьмана, В.Х. Далєки, В.Т. Доманського, О.В. Котельникова, К.Г. Марквардта, В.Є. Розенфельд, В.В. Скалозуба, Е.Д. Тартаковського, А. Schmieder, М.В. Хвороста та ін. В області підвищення економічності

режимів роботи енергосистем: В.А. Венікова, Н.А. Мельникова, R. Pelissier, Б.С. Стогнія, В.Ф. Харченка, А.К. Шидловського та ін.

Запропонований в дисертації підхід до розробки комплексних інформаційних технологій енергозбереження на МЕТ дозволив розвинути і узагальнити фундаментальні дослідження відмічених вище авторів у області режимів СТЕ з урахуванням їх нерозривного взаємозв'язку з енергосистемами і специфікою роботи на оптовому ринку електроенергії (ОРЕ).

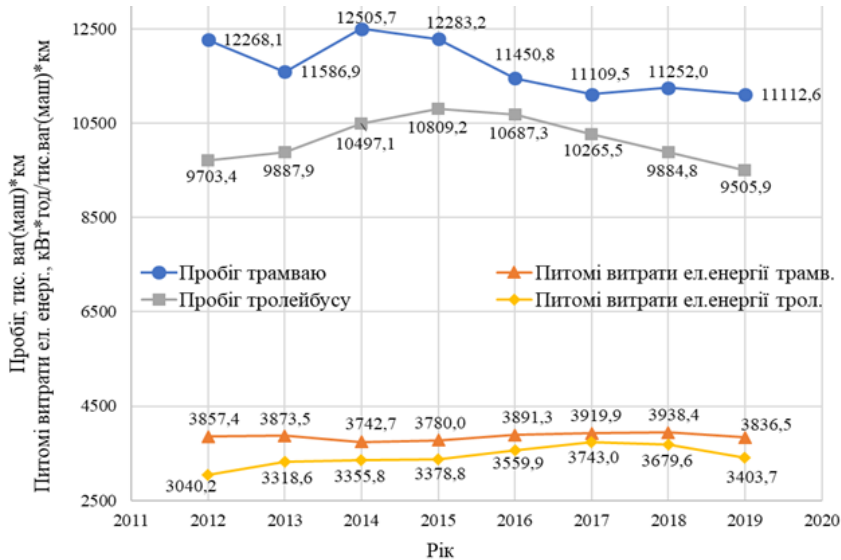


Рисунок 1 – Динаміка зміни обсягів перевезень і питомих витрат електроенергії

не тільки МЕТ (рис. 1), але і другим видам транспорту: зі зниженням обсягів пробігу рухомого складу зростають питомі витрати електричної енергії. В результаті енергоємність процесу перевезень підвищилась в 1,6 раз (рис. 2).

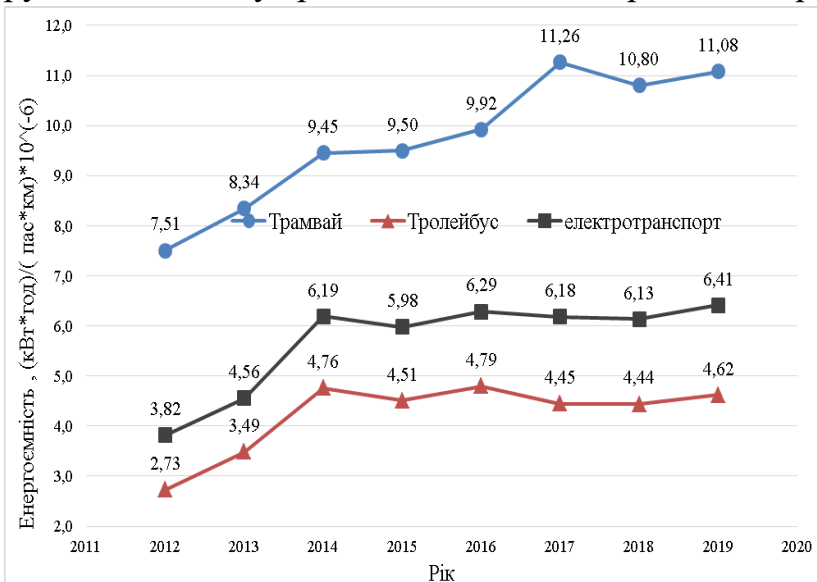


Рисунок 2 – Динаміка зміни енергоємності міського електричного транспорту України за період 2012–2019 рр.

електроенергії запропоновано збільшення до 12–24 числа пульсацій випрямленої напруги перетворювачами тягових підстанцій та застосування пристроїв компенсації реактивної потужності живильних ліній енергосистем.

У першому розділі виконано системний аналіз енергозберігаючої діяльності МЕТ, обґрунтована і запропонована концепція їх розвитку, що забезпечує ресурсо- і енергозбереження. Істотною перевагою перевезень електротранспортом є їх мала питома енергоємність, що в умовах енергодефіцитності дає вигідні умови для МЕТ, пасажиробіг якого складає 12,8%, а питомі енергозатрати – 0,8 кґуп/100 пас.км. Підтверджена тенденція властива

не тільки МЕТ (рис. 1), але і другим видам транспорту: зі зниженням обсягів пробігу рухомого складу зростають питомі витрати електричної енергії. В результаті енергоємність процесу перевезень підвищилась в 1,6 раз (рис. 2).

Встановлено, що фактичний знос трамваїв і тролейбусів складає 75%, а пристроїв тягового електропостачання – 85%. З терміном служби понад 40 років на сьогодні працюють 73% від загальної кількості тягових підстанцій. Збільшення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання МЕТ найрезультативніше шляхом підвищення напруги електроенергії, що подається на вводи тягових підстанцій. Для підвищення якості

У розділі визначені основні фактори, що впливають на енергоспоживання в галузі, серед них: підвищення обсягу енергії рекуперації при одночасному поліпшенні якості та ефективному її використанні; оптимізація режимів ведення трамваїв і тролейбусів по енерговитратах. Визначено стан технічних засобів і технологій та шляхи підвищення їх енергетичної ефективності і напрями енергозберігаючих технічних рішень МЕТ на період до 2035 року.

У другому розділі запропоновано метод визначення потенціалу енергозбереження МЕТ та напрями його реалізації при здійсненні основного виду діяльності –

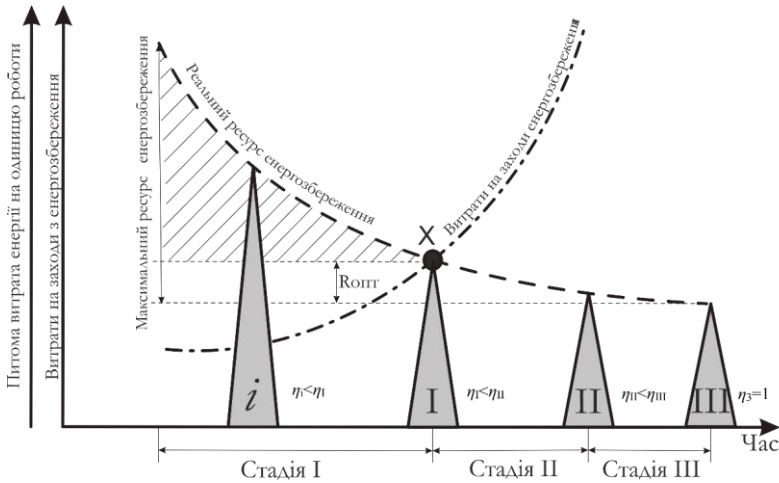


Рисунок 3 – Стратегія визначення потенціалу енергозбереження МЕТ

процесу перевезень (рис. 3). Вирішена задача впливу множини показників на енергоспоживання основних технічних засобів і технологій у всіх сферах діяльності МЕТ (реальний потенціал енергозбереження), а саме для: організації процесу перевезень – обсяг перевезень; трамваїв і тролейбусів – максимальний рівень експлуатаційного ККД, реалізація рекуперативного гальмування; системи електропостачання – мінімальний рівень технологіч-

них втрат і перетоків потужності, компенсація реактивної потужності в живильних лініях енергосистем; пристроїв колії – мінімальний рівень опору колійних конструкцій руху трамваїв.

Як показує експлуатаційна практика, оптимізаційна задача подібного роду апроксимується експоненціальними залежностями, особливо в умовах багатфакторного впливу, яким і є процес формування питомої витрати ПЕР на тягу трамваїв і тролейбусів. На стадії I вся система працює, займаючи проміжне положення  $i$ . У цьому випадку фактичний ККД 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. Точка X є граничним станом, коли всі технічно досяжні і економічно виправдані рішення реалізовані. Система працює з ККД  $\eta_1$  і оптимізованими втратами енергії  $\Delta_{\text{опт}}$ . На цьому завершується стадія I процесу енергозбереження, яка найефективніша і масово використовується на практиці. Стадія II, відноситься до зниження питомої витрати ПЕР, яке можливе технічно, або з більш витратною ціною і використовується набагато рідше – наприклад, в умовах дефіциту енергоресурсів або дуже високих тарифів на них. Стадія III використовується лише в наукових цілях при необхідності відтворення граничних можливостей системи. Модель формування енергозберігаючої діяльності МЕТ ілюструється (рис. 4) зіставленням динаміки зміни обсягів пасажирських перевезень і використання ПЕР (в умовному обчисленні) за минулий період.



Для підвищення енергоефективності процесу перевезень МЕТ запропоновано: створення нового покоління енергетично ефективного рухомого складу, підвищення рівня напруги передачі енергії до тягових підстанцій, використання накопичувачів енергії і рекуперативного гальмування; застосування енергоефективних технологій управління процесом перевезень з використанням на рухомому складі систем супутникової навігації; широкомасштабне впровадження засобів технічного діагностування в тягових мережах.



Рисунок 4 – Динаміка зміни загального обсягу перевезень (тис. пас·км) і споживання енергоресурсів (тис. кВт·год), у % до попереднього року

нізації існуючих тягових мереж і електрорухомого складу, так і у сфері організації перевезень пасажирів в наступних напрямках: розробка енергетичних діаграм ділянок роботи МЕТ, що визначають граничні рівні рекуперації електричної енергії та максимальне використання рекуперації (економія до 10% електроенергії); застосування компенсаторів реактивної потужності в живильних лініях тягових підстанцій (економія електроенергії 3–4%).

На основі наведених вище показників процесу перевезень та аналізу наявного потенціалу енергозбереження технічних засобів і технологій визначено для кожного виду електротранспорту прогнозовані на найближчу (до 2025 року) та віддалену (до 2035 року) перспективи величини питомої витрати енергоресурсів на тягу. Прогноз базується на регресійному аналізі впливу показників та факторів, які мали суттєву дію на рівень енергоспоживання трамваями та тролейбусами за попередній період і визначили подальші тренди зміни питомої витрати енергоресурсів, характерні для кожного виду транспорту (рис.5). Для прогнозу питомої витрати енергоресурсів на розрахункові періоди на основі модельно-передбачуваного принципу використовувався математичний опис тренду шляхом введення в його рівняння обсягів перевізної роботи, прогнозованих для кожного виду транспорту і потенціалу енергозбереження. В цілому по електротранспорту прогнозоване зниження питомих витрат енергоресурсів щодо рівня 2019 р. складе відповідно до 2025 і 2035 рр. для трамваїв – 2,6 і 6,9%, для тролейбусів - 2,8 і 7,5%, або в середньому щорічно 0,8–0,9% в електротранспорті.

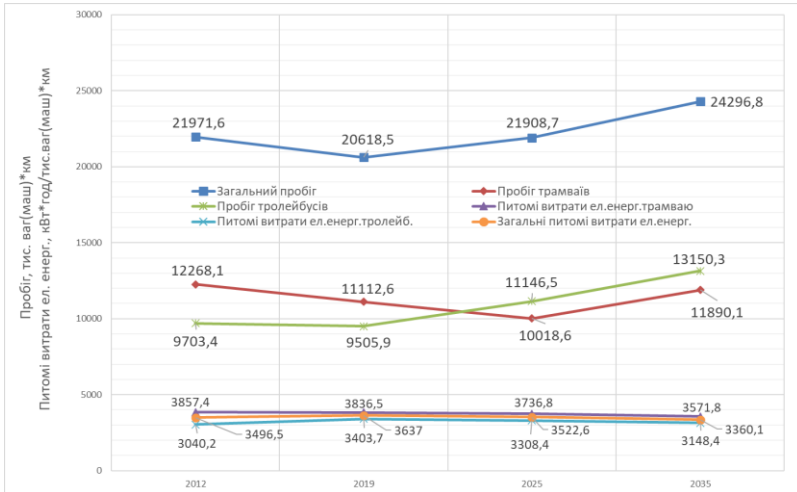


Рисунок 5 – Прогноз обсягів пробігу та питомих витрат електричної енергії на тягу до 2035 року

За весь період спостережень та прогнозування (2012–2035 рр.) буде досягнуто зниження питомих витрат енергоресурсів для трамваїв на 8,1% і для тролейбусів на 7,0%. Враховуючи стійкі тренди динаміки зниження питомого споживання енергетичних ресурсів в стаціонарній енергетиці комунальних підприємств електричного транспорту за останні 3 – 4 роки, прогноз потреби енергоресурсів в стаціонарній енергетиці розраховувався на їх основі.

У третьому розділі розглянуті теоретичні і практичні питання розвитку методів розрахунку та імітаційного моделювання режимів тягового електропостачання МЕТ з урахуванням СЗЕ, які дозволяють підвищити точність розрахунку перетоків потужності та втрат енергії (5–10%) та вибрати енергозберігаючі режими. Початкове узагальнене рівняння стану будь-якої миттєвої схеми (рис. 6) тягових мереж МЕТ може бути записано у вигляді повних рівнянь Кірхгофа у матричній формі:

$$\begin{pmatrix} M \\ N R_B \end{pmatrix} \cdot I_B = \begin{pmatrix} J \\ N E \end{pmatrix}; \quad I_B = \begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M \\ N R_B \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} J \\ N E \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $M_{m \times n}$  і  $N_{k \times n}$  – перша і друга матриці інцидентів;  $R_{Bn \times n}$  – матриця опорів віток;  $n$  – кількість віток схеми;  $m$  – кількість вузлів;  $k = n - m$  – кількість незалежних контурів;  $J$  – вектор задаючих струмів;  $E$  – вектор е.р.с. віток;  $I_B$  – вектор струмів віток схеми;  $I_\alpha$  – вектор струмів віток дерева схеми;  $I_\beta$  – вектор струмів віток хорд схеми.

Матриця  $M$  відображає з'єднання віток у вузлах схеми. За базисний слід приймати вузол, який відповідає точці підключення підстанції. Перед складанням матриці  $M$  необхідно задатися орієнтовним напрямком струмів в вітках схеми. Умовне зображення схеми, в якій

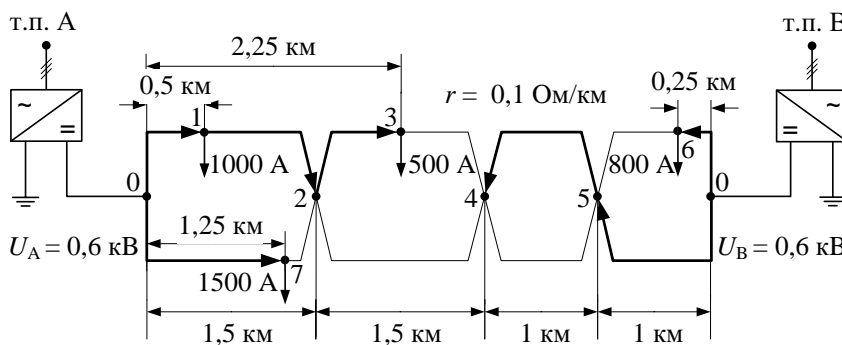


Рисунок 6 – Розрахункова схема тягової мережі та її направлений граф

вітки схеми замінені направленими відрізками, а вузли – точками, називають направленим графом, а будь-яку безперервну сукупність віток графа, яка охоплює усі вузли і не має замкнутих контурів, – деревом графа.

Доповнює опис графа матриця контурів, яка відображає об'єднання хорди і сукупності віток дерева в цикли. На рис. 6 дерево графа виділено жирними лініями. Матриці, які відносяться до дерева графа схеми, будемо позначати індексом  $\alpha$ , а матриці хорд схеми індексом  $\beta$ . Матриця опорів віток  $\mathbf{R}_B$  є квадратною з розмірністю, рівною кількості віток схеми. При цьому опір віток  $R_{ij}$  (між вузлами  $i$  і  $j$ ) записується по діагоналі відповідно до порядкових номерів віток. Опір підстанції виділяється в самостійну вітку, якій присвоюється відповідний порядковий номер. До активних параметрів схеми відносяться вектор задаючих струмів трамваїв  $\mathbf{J}$  і вектор е.р.с. віток  $\mathbf{E}$ . Якщо трамвай знаходиться в режимі рекуперації, елемент вектора  $\mathbf{J}$  береться негативним. При цьому знак е.р.с. у векторі  $\mathbf{E}$  береться негативним, якщо її напрямок збігається з раніше обраним напрямом струму в тій же вітці.

Для скорочення витрат машинного часу доцільно в цьому випадку використовувати перетворені матричні рівняння. З цією метою струми у вітках схеми представляють на підставі методу накладання у вигляді суми  $\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_B' + \mathbf{I}_B''$ . Тут складова  $\mathbf{I}_B'$  пов'язана з контурними струмами співвідношенням  $\mathbf{I}_B' = \mathbf{N}_t \mathbf{I}_K$ , де  $\mathbf{N}_t$  – транспонована друга матриця інциденцій;  $\mathbf{I}_K$  – вектор контурних струмів. Складову  $\mathbf{I}_B''$ , залежну від задаючих струмів трамваїв, можна знайти з виразу  $\mathbf{I}_B'' = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{J}$ , де  $\mathbf{M}_\alpha^{-1}$  – обернена матриця інциденцій для дерева схеми, яка відображає шляхи графа від кожного даного вузла до базисного. Тоді для визначення струмів в вітках схеми по відомим навантаженням трамваїв або тролейбусів і навантаженням зовнішньої системи електропостачання одержимо вираз

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{N}_t \left\{ (\mathbf{N} \mathbf{R}_B \mathbf{N}_t)^{-1} \left[ \mathbf{N} \mathbf{E} - \mathbf{N} \mathbf{R}_B \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{J} \right] \right\} + \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{J} . \quad (2)$$

Втрати напруги на ділянці мережі від будь-якого вузла до базисного знаходиться по виразу  $\Delta U = \mathbf{M}_{\alpha t}^{-1} \mathbf{U}_\alpha$ ;  $\Delta U = \mathbf{G}_y^{-1} \mathbf{J}$ , де  $\mathbf{U}_\alpha = \mathbf{R}_\alpha \mathbf{I}_B - \mathbf{E}_\alpha$  – вектор втрат напруги на вітках дерева схеми;  $\mathbf{R}_\alpha$  – матриця опорів віток дерева схеми;  $\mathbf{E}_\alpha$  – вектор е.р.с. у вітках дерева схеми,  $\mathbf{G}_y^{-1}$  – обернена матриця провідності вузлів, елементи якої визначаються за відомими значеннями провідності віток  $g_{ij} = 1/r_{ij}$ .

Розрахунок втрат енергії в тягових мережах зводиться до послідовного розрахунку ряду модельованих миттєвих схем

$$\Delta W = \sum_{i=1}^T \Delta P_i = \sum_{i=1}^T \mathbf{I}_{ti} \mathbf{R}_{Bi} \mathbf{I}_{Bi} \quad (3)$$

де  $\Delta P_i$  – втрати потужності при розрахунку  $i$ -ої миттєвої схеми;  $T$  – кількість вирішених миттєвих схем,  $\mathbf{I}_{ti}$  – транспонований вектор струмів в вітках схеми.

Порівняльна оцінка матричного та традиційного методів розрахунку миттєвої схеми ділянки трамвайної лінії з трьома поперечними з'єднаннями проводів контактної підвіски колій (рис. 6) приведена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Електротехнічні розрахунки

№ вітки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Струм вітки, А	1378	378	45	455	330	230	1030	962	538	205	330	430
№ вузла	1	2	3	4	5	6	7	Втрати потужності, кВт				324,9
Напруга вузла, В	68,9	106,7	110,05	76	43	25,75	120,25					286,6
	58,5	106,7	100,75	76	43	18,25	108,75					

Примітка: у чисельнику матричний метод розрахунку, в знаменнику – традиційний.

Зроблено висновок, що дійсні навантаження в вітках відрізняються від розрахованих з припущення повного паралельного з'єднання віток. Наприклад, дійсні навантаження віток 7 і 12 на 300 А більші за розраховані без урахування дійсного розташування поперечних з'єднань, а в деяких вітках (3 і 6) дійсний напрямок струмів є навіть протилежним. Похибка при визначенні втрат напруги може досягати також значної величини (до 30%). В тих вузлах, де здійснюється зв'язок контактних підвісок мережі (пункти паралельного з'єднання), втрати напруги, отримані обома методами розрахунку, збігаються. Відносна похибка втрати потужності складає 11,8 %.

В основу імітаційної моделі покладено синтез матричного методу розрахунку

миттєвих схем і методу статистичних випробувань для урахування організації руху ЕРС. Розроблені схеми формалізації графів і матриць, ділянок СТЕ і СЗЕ із щільними стрічковими і профільно-розрідженими матрицями. Запропоновані варіанти розрахунку СТЕ спільно з СЗЕ. Серед них: сумісний розрахунок мереж з використанням трансформацій; метод ітерацій для схем заміщення з однією базисною напругою і врахуванням впливу СЗЕ шляхом моделювання напруги холостого ходу тягових підстанцій як незалежних випадкових величин.

Для тягових мереж МЕТ при будь-яких схемах живлення ділянок зі складною організацією руху ЕРС розроблено метод розрахунку та моделювання основних електротехнічних параметрів і показників СТЕ з урахуванням живильних ліній енергосистем (рис. 7).

Тягова мережа багатоколієвих ділянок може бути подана комбінацією одноколієвих і двоколієвих. У вузлах СЗЕ і тягової мережі можна задавати навантаження відповідно до закону його зміни у часі. Вузлом тягової мережі є не тільки з'єднання віток схеми, але і точки рухомих навантажень ЕРС (трамваїв або троллейбусів). З цією метою тягова мережа розбивається на безліч спеціальних вузлів відпо-

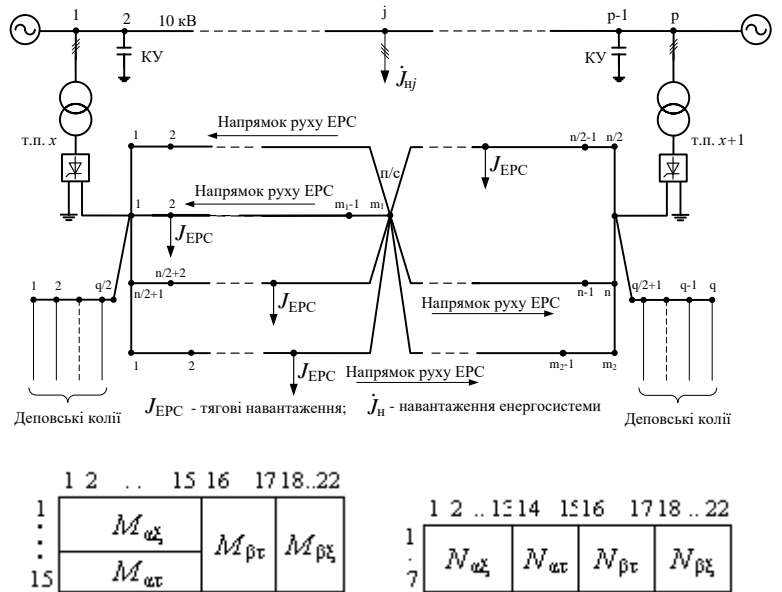


Рисунок 7 – Фрагмент енергосистеми і тягової мережі МЕТ та структура матриць

відно до швидкості руху різнотипних трамваїв. Кожен тип трамваїв споживає у момент часу  $t$  у своєму вузлі струм, який визначений характеристикою рухомого складу, профілем колії, режимом руху та ін. В цьому разі формула (2) для визначення вектору струмів у вітках має вигляд

$$\dot{I}_B = N_t \left\{ (N Z_B N_t)^{-1} \left[ N(\dot{E} + \dot{E}_\tau) - N Z_B \begin{pmatrix} M_\alpha^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \dot{J} \right] \right\} + \begin{pmatrix} M_\alpha^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \dot{J}, \quad (4)$$

де  $M$  і  $N$  – перша і друга матриці інциденцій СТЕ і СЗЕ структурно побудовані так, як показано на рис. 7;  $Z_B$  – матриця опорів віток тягової мережі та живильних ліній СЗЕ;  $\dot{J}$  – вектор задаючих струмів СТЕ і СЗЕ;  $\dot{E}$  – сумарний вектор е.р.с. віток. Тут елементи  $\tau$  у векторах  $\dot{E}_\tau$  і  $\dot{I}_B$  зв'язані залежностями  $\dot{E}_{\alpha\tau} = \dot{K} \dot{E}_{\beta\tau}$  і  $-\dot{K}^* \dot{I}_{\alpha\tau} = \dot{I}_{\beta\tau}$ , де  $\dot{K}$  – квадратна матриця коефіцієнтів трансформації розмірністю  $\tau$ . У свою чергу, у векторах  $\dot{I}_\alpha$  і  $\dot{I}_\beta$  струми віток розділені за принципом відсутності і наявності трансформацій. Тоді  $\dot{I}_\alpha = (\dot{I}_{\alpha\xi_1}, \dot{I}_{\alpha\xi_2}, \dots, \dot{I}_{\alpha\tau_1}, \dots, \dot{I}_{\alpha\tau_m})$ ,  $\dot{I}_\beta = (\dot{I}_{\beta\tau_1}, \dot{I}_{\beta\tau_2}, \dots, \dot{I}_{\beta\xi_k})$ . Аналогічно сумарний вектор е.р.с. віток  $(\dot{E} + \dot{E}_\tau)$  структуровано за принципом е.р.с. віток з трансформаціями дерева і хорд схеми та інших е.р.с.

Як початкові дані для моделювання були використані результати тягових розрахунків і експериментальні вимірювання навантаження трамваїв, параметри СТЕ і СЗЕ і інтенсивності руху. При цьому була прийнята ймовірна модель графіка руху трамваїв. Була можливість імітації роботи нерегульованих і регульованих компенсуючих пристроїв в живильних лініях тягових підстанцій. Використовувався принцип послідовного моделювання взаємопов'язаних миттєвих схем.

Результати імітаційного моделювання активних втрат енергії отримані для трамвайної міжпідстанційної зони двоколійної ділянки з вузловою схемою живлення, середньостатистичної довжини (4,4 км), з коливаннями напруги на шинах 0,6 кВ,  $\Delta U_{\max} = \Delta U_{\min} = 150$  В і середнім квадратичним відхиленням  $\sigma_0 = 30$  В. Опір тягової мережі визначається зміною типів підвісок МФ100 і М95+МФ100 при рейках Р65. Максимальна різнотипність трамваїв – 8 типів, а мінімальна – два типи. Ступінь використання пропускної здатності  $N/N_0$  змінюється від 0,53 до 0,8. Відношення часу ходу трамваю по фідерній зоні до часу його ходу під струмом  $\alpha$  змінюється в межах від 1,2 до 1,8 по непарній колії і від 1,15 до 2,1 – по парній.

Втрати енергії та еквівалентний опір на вибраній зоні досліджені шляхом проведення багатоваріантних розрахунків повнофакторного експерименту при імітації роботи СТЕ протягом доби. Попередній аналіз дозволив виділити наступні фактори, що впливають на втрати енергії: зрівняльний струм, опір тяговій мережі, ступінь використання пропускної здатності, різнотипність трамваїв, відношення повного часу ходу трамваю по міжпідстанційній зоні до часу його ходу під струмом. В результаті отримуємо регресивні рівняння для визначення втрат активної енергії і еквівалентного опору тягової мережі міжпідстанційної зони

$$\Delta P = -470,1 + 17,7 \cdot I_{yp} + 185,4 \cdot R_{\phi z} + 2688,1 \cdot (N / N_0) - 645,9 \cdot \alpha - 1,3 \cdot I_{yp} \cdot R_{\phi z} + 13,4 \cdot I_{yp} \cdot (N / N_0);$$

$$K_s = 0,878 + 0,017 \cdot I_{yp} + 0,392 \cdot R_{\phi z} - 0,5141 \cdot (N / N_0) - 0,528 \cdot \alpha - 0,122 \cdot I_{yp} \cdot (N / N_0),$$

де  $I_{yp} = (U_A - U_B) / R_{\phi z}$  – зрівняльний струм, А;  $R_{\phi z} = r_k \cdot l_{\phi z}$  – опір фідерної зони;  $l_{\phi z}$  – довжина фідерної зони,  $N / N_0$  – ступінь використання провідної спроможності (середній для двох колій);  $\alpha$  – відношення часу ходу ЕРС до часу його ходу під струмом (середнє за типами ЕРС і напрямками).

Адекватність імітаційної моделі реальному процесу перевірялася за експериментальними даними, які отримані від АСКОЕ АК «Харківобленерго» та сучасних інформаційно-діагностичних комплексів «Регіна» (рис 8). Похибка при визначенні інтегральних показників витрат і втрат енергії не перевищує 3–5 %, а середньоквад-

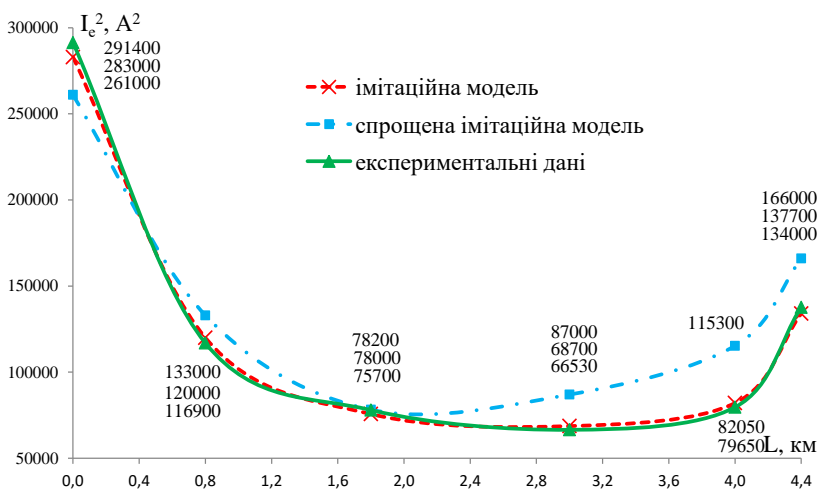


Рисунок 8 – Елюри середньоквадратичних струмів однієї колії типової міжпідстанційної зони з постом секціонування

ратичних струмів – 2,5–3 %. Це дозволяє з прийнятною точністю вести короткострокові і довгострокові прогнози електроспоживання при зміні пасажиропотоків, знаходити раціональні рішення при виборі енергоефективних режимів і схем живлення.

Таким чином на імітаційній моделі визначені основні техніко-економічні показники МЕТ та параметри нормальних та вимушених режимів роботи СТЕ і проведені дослідження маловивчених режимів роботи СТЕ. Серед них: оцінка

втрат потужності та перетоків потужностей по тяговим мережам міжпідстанційних зон з складною схемою живлення тягових підстанцій від енергосистем з напругою 6, 10, 35 кВ; визначення параметрів, які забезпечать релейний захист електротягових мереж при режимі короткого замикання.

**В четвертому розділі** на базі багаторівневого методу регулювання напруги і реактивної потужності з урахуванням ринкової економіки розроблені шляхи удосконалення та підвищення ефективності режимів роботи електричних систем з тяговими навантаженнями. Метод дозволяє оптимізацію рівнів напруги в великих енергосистемах звести до оптимізації в тягових мережах та ефективно використовувати джерела реактивної потужності.

У енергосистемі (рис. 9) є можливість виділити три підсистеми – надвисокої (рівень 1), високої (рівень 2) і низької (рівень 3) напруги. Порядок регулювання складається з двох етапів: етап оптимізації на рівнях 1 і 2 і визначення вузлових точок контролю для рівня 3; етап прямого регулювання на рівні 3 з урахуванням даних АСУЕ для рівня 1.

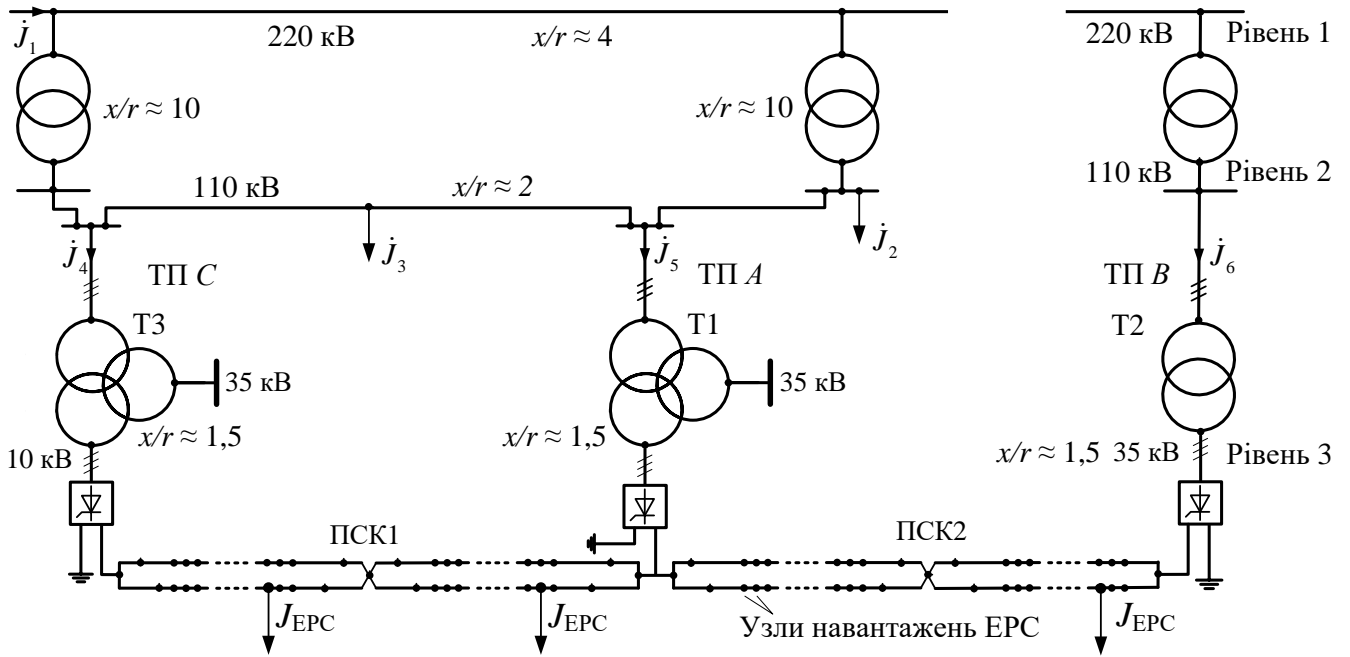


Рисунок 9 – Фрагмент енергосистеми з рівнями надвисокої напруги (рівень 1), та високої напруги (рівень 2) і напруги тягової мережі (рівень 3)

Етап оптимізації для визначення  $U$  і  $Q$  по мінімуму  $F$  (цільова функція) передбачає наступні обмеження:  $K_{t \text{ мін}} \leq K_t \leq K_{t \text{ макс}}$ ;  $Y_{\text{мін}} \leq Y \leq Y_{\text{макс}}$ ;  $E_{g \text{ мін}} \leq E_g \leq E_{g \text{ макс}}$ ;  $U_{\text{мін}} \leq U \leq U_{\text{макс}}$ ;  $Q_{\text{мін}} \leq Q \leq Q_{\text{макс}}$ , де  $K_t$  – коефіцієнт трансформації трансформатора;  $Y$  – провідність джерел реактивної потужності;  $E_g$  – різниця між величиною навантаження споживачів і генерації;  $U$  – напруга;  $Q$  – реактивна потужність.

Оптимізація виконується з використанням критеріальної функції

$$f = \alpha(\Delta U_k)^2 + \beta(\Delta Q_k)^2, \quad (5)$$

де  $\Delta U_k$  і  $\Delta Q_k$  – відхилення  $U$  і  $Q$  в точці  $k$  від встановлених значень.

Проблема полягає в мінімізації  $f$  при наступних обмеженнях

$$U_{k \text{ мін}} \leq U_k \leq U_{k \text{ макс}}; \quad Q_{k \text{ мін}} \leq Q_k \leq Q_{k \text{ макс}}. \quad (6)$$

При багатоступеневому наближенні цільова функція всієї системи:

$$F = F_0 + \sum_i F_i + \sum_i \sum_j (\alpha(\Delta U)^2 + \beta(\Delta Q)^2). \quad (7)$$

Перший і другий члени виразу представляють втрати реактивної потужності в системі (рівень 1) і (рівень 2). Реальна функція складається з перших двох членів.

Для підсистеми надвисокої напруги (рівень 1) необхідно визначити  $Q^{(1)}$  і  $U^{(1)}$  і мінімізувати їх значення при наступних обмеженнях  $U_{1 \text{ мін}} \leq U^{(1)}_1 \leq U_{1 \text{ макс}}$ ;  $Q_{\text{мін}} \leq Q \leq Q_{\text{макс}}$ , тобто

$$F_0 = \sum_i \sum_j^{N_i} X_L Q_L^2, \quad (8)$$

де  $X_L$  – індуктивний опір лінії;  $Q_L$  – реактивна потужність по лінії.

$$Q^{(1)}_i = \sum_j^{L_i} Q_{ij}; \quad U^{(1)}_1 = X_L^T Q_L - \frac{1}{2} X_L^T q, \quad (9)$$

де  $Q^{(1)}_i$  – реактивна потужність, що протікає через трансформатор від підсистеми  $i$ ,  $Q_{ij}$  – реактивна потужність, що протікає по лінії  $i - j$ ;  $q$  – змінні втрати, викликані потоком активної потужності  $P_{ij}$  по лінії  $i - j$ .

Ця задача вирішується шляхом квадратичного програмування де цільова функція квадратична, а всі обмеження лінійні.

Для підсистеми високої напруги (рівень 2) в підсистемі  $i$  підстановкою  $Q^{(2)}_i$ ,  $U^{(2)}_{1i}$ ,  $\Delta K_i$ ,  $Q_g$ ,  $Q_s$  і  $Q_0$  зводимо до мінімуму  $F_i$  при наступних обмеженнях:

$$Q_{0i} + \left( Q_i^{(2)} - X_{Ti} \frac{P_i^2 + (Q_i^{(2)})^2}{(U_{1i}^{(2)})^2} \right) + \sum_{j=1}^{J_i} \left( Q_{gij} - X_{gij} \frac{P_{gij}^2 + Q_{gij}^2}{U_{gij}^2} \right) - \sum_{j=1}^{K_i} \left( Q_{sij} + X_{sij} \frac{P_{sij}^2 + (Q_{sij}^{(2)})^2}{(U_{1sij}^{(2)})^2} \right) - Q_{Li} = 0. \quad U_{1i \text{ мін}} \leq U_{1i}^{(2)} \leq U_{1i \text{ макс}}; \quad Q_{i \text{ мін}} \leq Q^{(2)}_i \leq Q_{i \text{ макс}};$$

$$\Delta K_{i \text{ мін}} \leq \Delta K_i \leq \Delta K_{i \text{ макс}}; \quad Q_{0i \text{ мін}} \leq Q_{0i} \leq Q_{0i \text{ макс}}; \quad Q_{g \text{ мін}} \leq Q_g \leq Q_{g \text{ макс}}; \quad Q_{c \text{ мін}} \leq Q_c \leq Q_{c \text{ макс}}.$$

$$F_i = \sum_{j=1}^{J_i} \left( X_{gij} \frac{P_{gij}^2 + Q_{gij}^2}{U_{gij}^2} \right) + \sum_{j=1}^{K_i} \left( X_{sij} \frac{P_{sij}^2 + (Q_{sij}^{(2)})^2}{(U_{1sij}^{(2)})^2} \right) + X_{Ti} \frac{P_i^2 + (Q_i^{(2)})^2}{(U_{1i}^{(2)})^2}; \quad (10)$$

$$Q_{sij} = Q_{lij} - Q_{cij} + X_{tij} \frac{P_{sij}^2 + (Q_{sij}^{(2)})^2}{(U_{1sij}^{(2)})^2}; \quad U_{1i}^{(2)} = (1 + \Delta K_i) U_{2i} + X_{Ti} \frac{Q_i}{U_{1i}}, \quad (11)$$

де  $U_{1i}^{(2)}$  – вторинна напруга на підстанції  $i$ ;  $\Delta K_i$  – невелика зміна коефіцієнта трансформації трансформатора на підстанції  $i$ ;  $Q_0$  – реактивна потужність статичного джерела;  $Q_g$  – реактивна потужність генератора;  $Q_{sij}^{(2)}$  – потік реактивної потужності від підстанції  $j$  в підсистему  $i$ , визначений на рівні 2;  $P_{sij}^{(2)}$  – то ж для потоку активної потужності;  $X_{gij}$  – індуктивний опір між підстанцією  $i$  і генератором  $j$ ;  $X_{Ti}$  – індуктивний опір трансформатора в підсистемі  $i$ ;  $P_i^{(2)}$ ,  $Q_i^{(2)}$  – відповідно активна і реактивна потужності підстанції  $i$ , визначені на рівні 2;  $Q_{cij}$  – реактивна потужність статичного джерела на підстанції  $j$  в підсистемі  $i$ .

Процес розрахунку починається підстановкою (10) в (11) для отримання оптимальних значень  $Q_i^{(2)}$ ,  $U_i^{(2)}$ ,  $\Delta K_i$ ,  $Q_{0i}$ ,  $Q_g$ ,  $Q_s$  при дотриманні обмежень;  $U_{gij}$  – постійна ( $i = 1, 2, \dots, J_i$ ),  $U_{2i}$  – постійна,  $U_{1i}$  приймається рівною 1,0 в відносних одиницях.  $P_{sij} \cong P_{lij}$  – постійні, а  $Q_{lij}$ ,  $P_{Li}$ ,  $Q_{Li}$  можуть бути прийняті постійними, тому що  $P_l$ ,  $Q_l$ ,  $P_{Li}$ ,  $Q_{Li}$  розраховані на базі передбачення навантажень для оптимального розподілу потужностей і регулювання  $U$  і  $Q$ .

Для підсистеми низької напруги (рівень 3) або підсистемі рівня 2 мінімізуємо



$$F_i = \alpha \sum_{j=1}^{J_i} (\Delta U_{2ij})^2 + \beta \sum_{j=1}^{K_i} (\Delta Q_{ij})^2, \quad (12)$$

де  $\alpha, \beta$  – вагові коефіцієнти.

Регулювання відбувається автоматично. при наступних обмеженнях  $Q_{cij}$  і  $\Delta k_{ij}$ :  
 $U_{1sij \text{ мін}} \leq U_{1sij}^{(3)} \leq U_{1sij \text{ макс}}; \Delta k_{ij \text{ мін}} \leq \Delta k_{ij} \leq \Delta k_{ij \text{ макс}}; Q_{cij \text{ мін}} \leq Q_{cij} \leq Q_{cij \text{ макс}}$

$$Q_{sij} = Q_{lij} - Q_{cij} + X_{tij} \frac{P_{sij}^2 + (Q_{sij}^{(3)})^2}{(U_{1sij}^{(3)})^2}; \quad U_{1sij} = (1 + \Delta k_{ij}) U_{2sij} + X_{tij} \frac{Q_{sij}^{(3)}}{U_{1sij}^{(3)}}, \quad (13)$$

де  $\Delta k_{ij}$  – незначна зміна коефіцієнта трансформації трансформатора  $j$  в підсистемі  $i$  при регулюванні напруги і реактивної потужності під навантаженням.

При використанні багатоступінчатого апарату для оптимізації визначені граничні умови між рівнями 1 і 2 та 2 і 3:

$$Q^{(1)} - Q^{(2)} = 0; \quad U^{(1)}_1 - U^{(2)}_1 = 0; \quad Q^{(2)} - Q^{(3)} = 0; \quad U^{(2)}_{1s} - U^{(3)}_{1s} = 0. \quad (14)$$

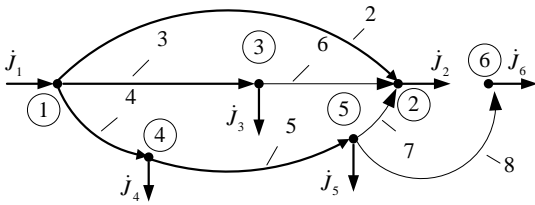


Рисунок 10 – Граф неоднорідної замкнутої мережі

У розділі встановлено, що паралельна робота неоднорідних мереж 110 і 10 кВ, 220 і 35 кВ призводить до збільшення еквівалентного активного опору і як наслідок втрати потужності на 15–20 % при передачі енергії. Для вибору енергозберігаючих схем живлення при зміні пасажиропотоку розроблені узагальнені методи визначення перетоків потужності по тяговій мережі з використанням імітаційних моделей

та реальних вимірювань в автоматизованих системах комерційного обліку електроенергії. Так на рис. 10 показано граф фрагмента принципової схеми неоднорідної замкнутої мережі. Такі схеми, або подібні до них, досить часто зустрічаються при живленні тягових навантажень міського транспорту. Основним навантаженням мережі є навантаження системи  $J_2$  і  $J_3$ , навантаження ТП мають істотно менше значення. Вітки графа схеми мають різні відношення реактивного опору до активного  $\xi = x/r$ . Для наведеної схеми умови нагрівання проводів мережі нижчої напруги обмежують пропускну здатність усієї мережі. Частина мережі вищої напруги (220, 110 кВ) не довантажується, а частина мережі з менш високою напругою перевантажується. Переток потужності йде по вітках 7 і 8 графа схеми. Явище перетоків потужності тяговими мережами як правило, залежать від зовнішнього електропостачання. Але і тягові мережі міського транспорту, також вносять свій вплив, коли перерозподіляють перетоки. При великій кількості трамваїв або тролейбусів на фідерній зоні чистого перетоку може і не відбутися. Але при відсутності ЕРС на фідерній зоні або їх малій кількості переток буде йти максимального значення. Для визначення перетоку потужності в тяговій мережі запропонована формула

$$W_{\text{пер}} = \sum_{i=1}^T \left( I_{ni} U_{mi} - \Delta P_i \right) - 2,725 \sum_{j=1}^m \int_{S_{nj}}^{S_{kj}} F_k(S) \eta^{-1}(S) dS \quad (15)$$

де  $W$  – повна витрата електроенергії тягової підстанції;  $\Delta W$  – втрата енергії в тягових мережах;  $I_{ni}$  – миттєві значення струмів плечей живлення тягової підстанції;  $U_{ши}$  – миттєве значення напруги на шинах тягової підстанції;  $T$  – кількість вирішених миттєвих схем;  $m$  – кількість ЕРС на міжпідстанційній зоні;  $\eta$  – к.к.д. одиниці рухомого складу;  $F_k$  – сила тяги одиниці рухомого складу.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення енергоефективності роботи підприємств МЕТ за рахунок енергозберігаючих режимів в системах електропостачання. На основі отриманих результатів досліджень зроблено наступні висновки:

1. Проаналізовано проблеми і процеси енергоефективності та енергозбереження систем електропостачання МЕТ та визначено основні фактори, що впливають на споживання енергоресурсів, зокрема це тип рухомого складу, параметри та характеристики тягової мережі, інтенсивність руху, швидкість сполучення та оптимізація режимів руху електрорухомого складу залежно від енерговитрат. Встановлено, що при зменшенні загального обсягу перевезень на МЕТ на 47,4 % по Україні, питомі витрати електроенергії збільшились на 1,4 %, а енергоемність процесу перевезень збільшилась у 1,6 разів. Це вказує на наявність невикористаних резервів з енергозбереження, тому обґрунтовані основні шляхи підвищення енергоефективності систем електропостачання.

2. Удосконалено методи дослідження параметрів енергоефективності та розроблено шляхи визначення потенціалу енергозбереження МЕТ, що дозволяє ефективно використовувати технічні засоби і технології енергозбереження. На основі цього здійснено прогноз потреби міського транспорту в енергетичних ресурсах на перспективу до 2035 року, з якого видно, що зниження питомих витрат складе в середньому до 0,8–0,9% щорічно.

3. Розроблено алгоритми та імітаційні моделі систем тягового електропостачання МЕТ з урахуванням режимів роботи енергосистем. Створено єдиний імітаційний комплекс, що враховує графіки руху трамваїв та тролейбусів, перетоки потужності в системах електропостачання. Для тягових мереж МЕТ запропоновано новий метод розрахунку та визначення тягових навантажень для різних типів рухомого складу, який дозволяє отримати узагальнюючі залежності перетоків потужності і втрат енергії, та підвищити точність розрахунків результуючих параметрів до 5–7 %.

На основі урахування взаємозв'язку систем внутрішнього і зовнішнього електропостачання МЕТ удосконалено методи розрахунку електротехнічних параметрів, що дозволяють, враховуючи багаторівневий метод використання напруги, обґрунтувати шляхи удосконалення та підвищення ефективності режимів роботи електричних систем. Обґрунтовано, що робота неоднорідних мереж напруги різних рівнів в паралельному режимі викликає підвищення еквівалентного активного опору та зростання втрати потужності на 5–10 %.

4. Визначено можливості використання нових науково-технічних рішень у енергозберігаючих схемах живлення, запропоновано інформаційні технології та технічні засоби для підвищення енергоефективності електропостачання. Запропоновано для підвищення якості електроенергії і зниження витрат та часу будівництва но-

вих тягових підстанцій приєднувати їх до мереж АТ «Харківобленерго» більш високої напруги. Це сприяє підвищенню надійності і безпеки електропостачання, створенню пересувних тягових підстанцій нового покоління з розподільчими пристроями напругою 10 кВ і 35 кВ та приєднанню тягових підстанцій до мереж зовнішнього електропостачання по першому класу для зниження коштів на закупку електроенергії. З використанням імітаційної моделі встановлено, що найменшу похибку і простоту в технічній реалізації має спосіб визначення втрат енергії за ампер-квадрат-годинами. На основі цього з використанням сучасних мікропроцесорних систем запропоновано лічильник втрат енергії.

5. Результати дисертаційної роботи рекомендовані для подальшого впровадження на підприємствах ТОВ «ДАК-Енергетика», КП «Міськелектротранссервіс» та використовуються у початковому процесі Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, що підтверджено актами. Дослідження показують, що комплексне впровадження запропонованих засобів енергоефективності та ресурсозбереження систем внутрішнього і зовнішнього електропостачання міського електротранспорту дозволить знизити питомі витрати енергоресурсів для трамваїв на 8,1 % і для тролейбусів на 7,0 %, та за даними ТОВ «ДАК-Енергетика» забезпечить економічний ефект на суму близько 0,63 млн. грн на рік.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Основні результати дисертації опубліковані:*

1. В. Х. Далека, О. С. Гордієнко, Д. О. Личов. Математичні методи і моделі оптимізації виробничих програм підприємств міського електротранспорту в проектах ресурсозбереження // *Коммунальное хоз-во городов: Научн.-техн. сб.: Выпуск 79.* – К.: Техніка. 2007. – С. 299 – 305.

*Обґрунтовано цілі економіко-математичного моделювання на міському електротранспорті.*

2. О.С. Гордієнко Н.В. Гарбуз, С.П. Шацький. Дослідження процесів енергоспоживання комунальним підприємством «Краматорське ТТУ» // *Коммунальное хоз-во городов: Научн.-техн. сб.: Выпуск 88.* – К.: Техніка. 2009. – С. 313 – 317.

*Побудовано математичні моделі витрат електроенергії.*

3. В. М. Бушма, О. С. Гордієнко, С. П. Шацький. Моделювання витрат енергоресурсів на підприємствах міського електротранспорту // *Управління проектами, системний аналіз і логістика: Науковий журнал. Вип.7.* – К.: НТУ, 2010. – С. 236 – 240.

*Розраховано мультиплікативну модель витрат електроенергії для підприємств міського електричного транспорту.*

4. О. С. Гордієнко. Енергоефективність транспортних підприємств як результат процесів енергозбереження // *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. Вип. 97.* К.: Техніка, 2011.- С. 268 – 272.

5. О. С. Гордієнко, С. Ю. Андреев. Енергозбереження на підприємствах ЖКГ // *Коммунальное хоз-во городов: Научн.-техн. сб. : Выпуск 107.* – Киев: Техніка. 2013. – С. 360 – 364.

*Виконано прогнозування витрат енергоресурсів та теплоносія для КП «ХТМ».*

6. О. С. Гордиенко. Методика планирования расхода электроэнергии для коммунального предприятия «Харьковские тепловые сети» // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, №4(193), 2013. – С. 73-77.

7. В. Х. Далека, А. В. Шкрябко, О. С. Козлова. Методи підвищення ефективності систем електропостачання на міському електричному транспорті // *Електрифікація транспорту*. – 2018. № 15. С. 84–90.

*Розроблено метод підвищення ефективності систем електропостачання.*

8. О. С. Козлова. Підвищення енергоефективності технічних засобів і технологій транспорту. *Українська залізниця: Міжнародний техніко-економічний журнал*. 2019. №5(71). с. 7-10.

9. І. В. Доманський, О. С. Козлова. Методи аналізу режимів передачі і розподілу електроенергії в електричних схемах з тяговими навантаженнями. // *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб.* 2019. Вип. 1(147). С. 158-168.

*Запропоновано підвищення показників енергоефективності неоднорідних мереж в електричних схемах з тяговими навантаженнями.*

10. В. Ф. Харченко, О. С. Козлова. До питання реального потенціалу підвищення енергоефективності міського транспорту // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки», Том 30 (69) № 33.* 2019. – С.183-190.

*Запропоновано методи визначення потенціалу енергозбереження та прогнозу потреби енергоресурсів на перспективу.*

11. І.В. Доманський, О. С. Козлова. Перспективи розвитку електричних мереж зовнішнього електропостачання тягових підстанцій // *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 1(154). – С. 8-15.

*Запропоновані засади розвитку системи електротягових мереж міського транспорту шляхом збільшення напруги живлення тягових підстанцій.*

12. Shavkun V, Pavlenko T, Kozlova O. Development of algorithmic models for research of reliability parameters of trolleybus traction electric motors in the operation process. «EUREKA: Physics and Engineering», 2, 39-46. DOI:10.21303/2461-4262.2020.001174. (2020). Міжнародне рецензоване фахове видання (Scopus).

*Виконано обробку статистичних даних та розрахунок показників надійності.*

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

13. Л. М. Крутій, М. А. Голтв'янський, О. С. Гордієнко. Концепція вирішення питання рекуперації гальмівної енергії технічних засобів електротранспорту. *Сталій розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції*. – Харків: ХНАМГ, 2009. – С.17 – 19.

*Обґрунтовано шляхи рекуперації гальмівної енергії рухомого складу міського електротранспорту.*

14. В. Х. Далека, О. С. Гордієнко, С. В. Грінченко. Аналіз факторів, що впливають на перевитрати електроенергії при експлуатації міського електричного транспорту // *Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві: Матеріали II міжнарод-*

ної науково-практичної конференції. – Алушта: ХО НТТ КГ та ПО, ХНАМГ, 2010. – С. 158-159.

*Розглянуто особливості витрат енергоресурсів при експлуатації електротранспорту.*

15. О. С. Гордієнко. Прогнозування енерговитрат підприємствами електротранспортної галузі. *XXXV науково-технічна конференція викладачів, аспірантів і співробітників Харківської національної академії міського господарства: програма і тези доповідей, Ч.2.* - 2010 р. – С. 23-24.

16. О. С. Гордієнко. Енергозбереження транспортних підприємств. // Спецвипуск журналу «Технологічний аудит та резерви виробництва», № 5/1(7) з матеріалами Міжнародної наукової конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації», Ч.1, Том «Енергетика та енергозаощадження. Транспортні технології.» 2012. – С. 13-14.

17. В. І. Скуріхін, О. С. Козлова, А. В. Шкрябло. Енергоефективність систем електропостачання на міському електричному транспорті. *Міжнародна науково-технічна конференція «Технологія та інфраструктура транспорту»: збірник тез доповідей,* - Харків: УкрДУЗТ, 2018. – С. 358-360.

*Виконано аналіз щодо критеріїв енергоефективності систем електропостачання на міському електричному транспорті.*

18. V. Shavkun, O. Kozlova. The energy expenses forecasting method by urban electric transport enterprises. *Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку технічних наук у країнах ЄС та в Україні»,* - Влоцлавек, Польща: Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku, 2018. – С. 47-51.

*Проаналізовано результати застосування методики прогнозування енерговитрат транспортними підприємствами.*

19. В. Т. Доманський, О. С. Козлова. Підвищення енергоефективності міського електротранспорту. *Концепція розвитку електричного транспорту та його систем: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 7 – 9 квітня 2020 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова та ін. ; [редкол. : М. Ф. Смирний, Н. І. Кульбашна].* – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – с. 83 – 84.

*Виконано обробку та аналіз статистичних даних транспортних підприємств.*

20. О. С. Козлова. Декомпозиция и синтез при расчете электротяговых сетей постоянного тока. *Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XIV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 15-16 грудня 2020р.).* –Д.: ДПТ, 2020. – С. 23.

## АНОТАЦІЯ

*Козлова О. С.* Підвищення енергоефективності систем електропостачання міського електричного транспорту. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі підвищення ефективності функціонування систем електропостачання міського елект-

ричного транспорту і зниження питомих витрат енергетичних ресурсів в процесі перевезень пасажирів.

Проведено аналіз ефективності енергетичного забезпечення процесу перевезень на міському електротранспорті та визначено вплив факторів на питомі витрати енергоресурсів. Обґрунтовано вибір факторів, що впливають на зменшення витрат енергетичних ресурсів на міському електротранспорті. Доведені необхідність та актуальність розробки методів і технологій підвищення енергоефективної роботи тягових мереж електричного транспорту. Розроблено наукові принципи підвищення енергоефективності систем електропостачання міського електротранспорту, які базуються на регресійному аналізі факторів, що мали суттєвий вплив на рівень електроспоживання трамваїв та тролейбусів та прогнозу зміни витрати енергоресурсів.

Обґрунтовано прогнозування витрат енергоресурсів, що враховує наявний потенціал енергозбереження та моделі показників транспортного процесу.

Розроблено алгоритми та імітаційні моделі систем тягового електропостачання міськелектротранспорту з урахуванням режимів роботи енергосистем. Створено єдиний імітаційний комплекс, що враховує графіки руху трамваїв та тролейбусів, перетоки потужності в системах електропостачання.

Запропоновано для підвищення якості електроенергії і зниження витрат та часу будівництва нових тягових підстанцій приєднувати їх до мереж АТ «Харківобленерго» більш високої напруги, що сприятиме підвищенню надійності і безпеки електропостачання.

Розроблено шляхи підвищення енергетичної ефективності режимів роботи в електричних системах з тяговими навантаженнями міського електротранспорту, які базуються на багаторівневому використанні напруги.

З використанням імітаційної моделі встановлено, що найменшу похибку і простоту в технічній реалізації має спосіб визначення втрат енергії за ампер-квадрат-годинами. На основі цього з використанням сучасних мікропроцесорних систем запропоновано лічильник втрат енергії з функцією визначення ампер-квадрат-годин.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані до впровадження, на підприємствах «ДАК-Енергетика», КП «Міськелектротранссервіс» та використовуються у начальному процесі Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, що підтверджено актами.

**Ключові слова:** система енергопостачання, тягова підстанція, зовнішнє електропостачання, потенціал енергозбереження, міський електричний транспорт.

## ABSTRACT

**Kozlova O. S. Improving the energy efficiency of urban electric transport power supply systems.** The qualification scientific work on the rights of manuscripts.

A thesis for the PhD degree in technical sciences on the speciality 05.22.09 – electric transport. – O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific problem of increase of efficiency of functioning of systems of power supply of city electric transport and decrease in specific expenses of power resources in the course of transportations of passengers.

The analysis of the efficiency of energy supply of the transportation process on urban electric transport is carried out and the influence of factors on the specific consumption of energy resources is determined. The choice of factors influencing the reduction of energy resources consumption on urban electric transport is substantiated. The necessity and urgency of developing methods and technologies for improving the energy efficiency of traction networks of electric transport are proved. Scientific principles for improving the energy efficiency of urban power supply systems have been developed, which are based on regression analysis of factors that had a significant impact on the level of electricity consumption of trams and trolleybuses and the forecast of changes in energy consumption.

The forecasting of energy consumption is substantiated, which takes into account the available energy saving potential and the model of transport process indicators.

Algorithms and simulation models of traction power supply systems of urban electric transport have been developed, taking into account the modes of operation of power systems. A single simulation complex has been created, which takes into account the schedules of trams and trolleybuses, power flows in power supply systems.

It is proposed to connect them to the networks of JSC "Kharkivoblenergo" of higher voltage in order to improve the quality of electricity and reduce the costs and time of construction of new traction substations.

Ways to increase the energy efficiency of operating modes in electrical systems with traction loads of urban electric vehicles, which are based on multilevel voltage use, have been developed.

Using the simulation model, it was found that the least error and simplicity in the technical implementation has a way to determine energy losses by ampere-square-hours. Based on this, using modern microprocessor systems, an energy loss meter with the function of determining ampere-square-hours is proposed.

The results of the dissertation are recommended for implementation at the enterprises "DAK-Energy", KP "Miskelektrotransservis" and are used in the initial process of the O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, which is confirmed by acts.

**Keywords:** power supply system, traction substation, external power supply, energy saving potential, urban electric transport.

Підп. до друку 30.03.2021. Формат 60×84/16.  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 0,9.  
Тираж 100 пр. Зам. № 10204.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.