

УДК 620.91:504.06

Наталія Майстренко*, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-1757-1665>

Ігор Клімук

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича 172, м. Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: maistrenkonatalia27@ukr.net

ЗАХОДИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕТРОПОЛІТЕНІ (НА ПРИКЛАДІ БІМЕТАЛЕВИХ КОНТАКТНИХ РЕЙОК)

Анотація. Метою цього дослідження є розвиток методів і засобів довгострокового прогнозування електроспоживання на основі удосконаленого комплексного методу прогнозування попиту на електроенергію з урахуванням особливостей електровикористання метрополітену м. Києва та його впливу на електроспоживання міста. Науковою новизною отриманих результатів є врахування технологічного потенціалу із заходами з електрозбереження, що впливають на рівень II та рівень III в моделі енергоспоживання, яка враховує як загальний потенціал електрозбереження (від структурних і технологічних зрушень) в країні в цілому, так і особливості на регіональному рівні (місто Київ) у видах економічної діяльності у наданні транспортних послуг (метрополітен). При виконанні роботи було зібрано матеріал щодо заходів з електрозбереження в метрополітені та прогнозах розвитку цього виду надання послуг (перевезення пасажирів). Для досягнення достатнього та сталого енергоспоживання важливим є впровадження енергоефективних технологій, які дозволять зменшити витрати електроенергії без втрати продуктивності та якості обслуговування пасажирів. Біметалеві контактні рейки є більш ефективними з точки зору передачі електричного струму та зменшення енергетичних втрат. Така інновація відкриває нові можливості для сталого розвитку міського транспорту та сприяє створенню більш ефективних та зручних умов для мешканців міста. Передбачені заходи по захисту споруд та обладнання дільниці, що проєктується та будується, лінії метрополітену від електрокорозії. Обчислення потенціалів електрозбереження на регіональному рівні (м. Київ) дозволило більш точно врахувати обсяги впровадження заходів з енергозбереження, оскільки такі програми розробляються саме на регіональному рівні. Ці оцінки використано при визначенні технологічного потенціалу енергозбереження. При збереженні темпів розвитку економіки технологічний потенціал електрозбереження в м. Києві до 2040 р. досягне рівня 600 млн кВт·год.

Ключові слова: метрополітен, електрозбереження, потенціал електрозбереження, прогнозування, енергетична ефективність, електроенергія.

1. Вступ

Стійке енергозбереження та досягнення екологічної сталості нині є актуальною метою, яка посилить достатність енергоспоживання в різних секторах економіки. Суттєве значення це має в міському громадському транспорті як ланці забезпечення потреб людини і економіки, оскільки великі обсяги електроенергії використовуються щоденно для забезпечення руху транспортних засобів. Метрополітен як важлива складова системи громадського транспорту відіграє вирішальну роль в транспортному забезпеченні міста. Однак разом із зростанням його популярності та розширенням мережі зростають і витрати електроенергії. Для досягнення достатнього енергоспоживання важливим є впровадження енергоефективних технологій, які дозволять зменшити витрати електроенергії без втрати продуктивності та якості обслуговування пасажирів. Прогнозуванню енергоспоживання в економіці присвячено чимало робіт вітчизняних та зарубіжних учених [1–18], в тому числі для метрополітену [21–32].

Метою дослідження є розвиток методів і засобів довгострокового прогнозування електроспоживання на основі удосконаленого комплексного методу з урахуванням особливостей електровикористання в метрополітені міста (на прикладі Києва) і його впливу на загальне електроспоживання міста.

Методи дослідження: системний аналіз, економіко-математичне моделювання, аналітично-статистичний метод, сценарний метод, нормативний метод, комплексний метод, метод прямого рахунку.

Науковою новизною отриманих результатів є розвиток комплексного методу в частині удосконалення математичної моделі шляхом доповнення методики визначення прогнозного попиту на електроенергію для двох нижчих ієрархічних рівнів економіки, а саме – регіонального (м. Київ) та на рівні підприємства (метрополітен), включенням технологічного потенціалу електрозбереження.

2. Методичні підходи до прогнозування електроспоживання (визначення потенціалу енергозбереження)

Дослідження проведено для двох нижніх ієрархічних рівнів економіки, а саме – регіонального (м. Київ) та на рівні підприємства (метрополітен). Для них згідно з методикою [17] виділяється технологічний та регіональний потенціал енергозбереження. Сформована трирівнева модель [18] враховує особливості на регіональному рівні (місто) у певних (вибраних) ВЕД (метрополітен) у наданні послуг.

В Законі України «Про енергоефективність» економія енергії розглядається як «... обсяг скорочення споживання енергії, який визначається шляхом зіставлення обсягів споживання, вимірених та/або розрахованих до та після впровадження енергоефективних заходів із забезпеченням нормалізації умов, які впливають на енергоспоживання». Тут виділено поняття «енергетична ефективність – співвідношення між обсягом вироблених благ (результатів діяльності (функціонування), виробленої продукції (товарів, робіт, послуг) та енергії) і обсягом енергії, використаної для виробництва таких благ» [19].

Енергоефективні заходи – заходи, результатом реалізації яких є зниження питомих витрат енергії на одиницю вироблених благ (результатів діяльності (функціонування), виробленої продукції (товарів, робіт, послуг) та енергії) [19].

Для II рівня (регіон – м. Київ) використовується загальне рівняння [18]:

прогнозне сумарне електроспоживання за видами економічної діяльності (ВЕД) в регіоні:

$$P_{qf}^t = \sum_q e_{ВДВ_{qf}}^{\delta} V_{ВДВ_{qf}}^t - \sum_q \Delta E_{qf}^t, \quad (1)$$

де $e_{ВДВ_{if}}^{\delta}$ – електроємність ВДВ i -го виду економічної діяльності в f -му регіоні; $V_{ВДВ_{if}}^t$ – обсяг ВДВ у f -му регіоні у прогнозованому році, що задається прогнозовою структурою ВДВ; $\sum_i \Delta E_{if}^t$ – сумарний прогнозний потенціал електрозбереження у t -му році по всіх i -х видах економічної діяльності у прогнозованому році для економіки f -го регіону.

На більш низькому ієрархічному рівні може визначатися прогноз електроспоживання за енергоємними видами k -ї продукції, що виробляється за r -им розділом у q -й секції за ВЕД, що розвивається у f -му регіоні у t -му році за формулою (2) [18]:

$$P_{krqf}^t = b_{jk}^t V_{krqf}^t, \quad (2)$$

де b_{jk}^t – питомі витрати j -го виду енергоресурсу (електроенергія) при виробництві k -го виду продукції у t -му році для r -го виду економічної діяльності q -ї секції за ВЕД в економіці f -го регіону; V_{krqf}^t – прогнозний обсяг випуску продукції k -го виду в r -му класі, групі виду економічної діяльності q -ї секції за ВЕД у t -му році економіки f -го регіону.

Для трирівневої системи економіки потенціал електрозбереження (ПЕЗ) визначається за наступним алгоритмом:

на рівні r -го ВЕД f -го регіону по j -му виду енергоресурсу (електроенергія) ПЕЗ як зниження споживання j -го енергоресурсу у t -му році відносно базового року визначається за формулою (3) [18]:

$$\Delta E_{BEDrjf}^{\delta-t} = (e_{BDBrjf}^{\delta} - \Delta e_{BDBrjf}^{\delta-t}) V_{BDBrjf}^t, \quad (3)$$

де $\Delta E_{BEDrjf}^{\delta-t}$ – потенціал електрозбереження j -го виду енергоресурсу в r -му ВЕД f -го регіону у t -му році; e_{BDBrjf}^{δ} – електроємність ВДВ j -го виду енергоресурсу в r -му ВЕД f -го регіону у базовому році; $\Delta e_{BDBrjf}^{\delta-t}$ – зниження електроємності ВДВ j -го виду енергоресурсу в r -му ВЕД f -го регіону у t -му році відносно базового за рахунок енергозберігальних заходів; V_{BDBrjf}^t – прогнозний обсяг ВДВ в r -му ВЕД f -го регіону у t -му році;

на рівні f -го регіону по j -му виду енергоресурсу у t -му році відносно базового року [18]:

$$\Delta E_{jf}^{\delta-t} = (e_{BDBjf}^{\delta} - \Delta e_{BDBjf}^{\delta-t}) V_{BDBjf}^t, \quad (4)$$

де $\Delta E_{jf}^{\delta-t}$ – потенціал електрозбереження j -го виду енергоресурсу в f -му регіоні в t -му році; e_{BDBjf}^{δ} – електроємність ВДВ j -го виду енергоресурсу f -го регіону у базовому році; $\Delta e_{BDBjf}^{\delta-t}$ – зниження електроємності ВДВ j -го виду енергоресурсу в f -му регіоні у t -му році відносно базового року за рахунок енергозберігальних заходів за видами економічної діяльності регіонів та загально регіональних заходів.

3. Загальна частина

Основними споживачами електроенергії в метрополітені є обладнання станцій з напівперегонами, притунельні споруди та тягова мережа. Основними споживачами електроенергії станцій є ескалатори, вентсистеми, насосне устаткування, електроопалення, обладнання протипожежного захисту та системи безпеки. Комерційний облік споживаної електроенергії виконується на вводах 10 кВ СТП (спеціальної трансформаторної підстанції), технічний – на всіх лініях, що відходять, та на кабельних перемичках. Всі лічильники включаються в автоматизовану систему комерційного обліку електроенергії.

Існуюча мережа метрополітену доповнюється двома новими станціями Сирецько-Печерської лінії: «Мостицька» та «Проспект Правди». При цьому її загальна довжина збільшиться з 67,6 км до 71,4 км. Відповідно до ДБН В.2.3-7-2018 [20] проєкт ділянки лінії розроблено з урахуванням величини пасажирських потоків на перший період – десятий рік експлуатації лінії та на другий період (перспектива) – максимальний розвиток лінії за містобудівним прогнозом розвитку міста на 30–40 років, а також на рік введення лінії в експлуатацію.

В табл. 1 наведені дані по споживанню електроенергії на двох станціях метрополітену, що проєктуються та будуються.

Таблиця 1. Енергетичні показники роботи деяких станцій метрополітену

Показники	Разом	Станція «Мостицька»	Станція «Проспект Правди»
Встановлена потужність, кВт	9084	-	-
Споживана потужність всього, кВт	8176	4085	4091
в тому числі:			
силове електрообладнання	1835	906	929
електроосвітлення	568	232	336
обладнання АТРП	70	35	35
тягове навантаження	5703	2912	2791
Обсяг споживання за рік, МВт·год	53716,3	26838,4	26877,9

З наведених даних видно, що основна витрата електроенергії припадає на тягову мережу. Категорія надійності електропостачання – I, II, особлива група I категорії; до особливої групи I категорії надійності належать кола оперативного струму підстанції, енергодиспетчерські пункти, пристрої телемеханіки, пристрої автоматики і телемеханіки руху поїздів (АТРП), зв'язку, СУРСТ (система управління станцій метрополітену з теленаглядом), аварійне освітлення.

До I категорії надійності належить устаткування пожежогасіння і пожежної сигналізації, димовидалення, тягова мережа 825 В, ескалатори, водовідливні установки, вентвузли, робоче освітлення станцій і тунелів.

Всі інші споживачі відносяться до II категорії надійності. Основними споживачами електроенергії станції є ескалатори, вентсистеми, насосне устаткування, електроопалення, обладнання протипожежного захисту та системи безпеки.

Передбачені заходи по захисту споруд та обладнання дільниці, що проєктується, лінії метрополітену від електрокорозії, в тому числі:

- заходи по обмеженню витоків тягових струмів шляхом ізоляції тягових та колійних рейок;
- пасивний захист металевих конструкцій і металевих елементів залізобетонних конструкцій шляхом їх фарбування та гідроізоляції;
- способи прокладання кабелів і трубопроводів у тунелях, які виключають або обмежують електрокорозію;
- розміщення контрольно-вимірювальних пунктів;
- способи прокладання кабелів і трубопроводів у тунелях, на наземних та надземних дільницях, які виключають або обмежують електрокорозію.

Захисту від корозії блукаючими струмами (електрокорозії) підлягають такі споруди, конструкції і обладнання метрополітенів:

- конструкції підземних споруд – залізобетонні тунельні оправи, внутрішні сталеві оболонки та залізобетонні сорочки;
- рейки і рейкові скріплення;
- кабелі – силові, зв'язку, контрольні і сигнально-блокувальні;
- кабельні конструкції;
- сталеві і чавунні трубопроводи;
- обладнання тягового електропостачання в частині вимог з обмеженням витоку тягових струмів;
- обладнання рейкових ланцюгів автоблокування в частині вимог каналізації тягових струмів, підключення відсмоктувальних (негативних, що живлять) ліній і міжколійних рейкових перемичок (з'єднувачів) тягової мережі, захисного обладнання від електрокорозії.

Як інноваційне технологічне рішення біметалеві рейки мають потенціал значно покращити енергоефективність метрополітену, забезпечуючи водночас стабільну та безперебійну роботу системи. Розглядається можливість використання біметалевих контактних рейок замість традиційних металевих на двох нових станціях метро Сирецько-Печерської лінії: «Мостицька» та «Проспект Правди» в м. Києві з метою досягнення суттєвої економії електроенергії. Тут враховані потенційні економічні вигоди, які можуть бути отримані завдяки впровадженню біметалевих рейок у метрополітені на станціях, що плануються побудувати в м. Києві в найближчий час.

Освітлення приміщень станцій та перегонів виконується світильниками зі світлодіодним джерелом світла. Нормована освітленість прийнята відповідно до вимог ДБН В.2.3-7-2018 «Метрополітени» [20]. Передбачається два види освітлення: робоче та аварійне (евакуаційне).

Відповідно до ДБН В.2.3-7-2018 «Метрополітени» мережі робочого освітлення станцій і перегонів належать до I категорії надійності електропостачання, аварійного – до особливої групи I категорії.

Тягова мережа. Контактна мережа станції з прилеглими перегонами складається з контактних рейок головних колій, тупиків, з'їзду, кабельних ліній, кабельних перемичок, постів переключення з моторним приводом і пунктів підключення, які розташовуються біля контактної рейки.

Контактна рейка. Передбачено застосування контактної рейки:

- на головних та станційних коліях;
- при перевлаштуванні контактної рейки на з'їзді перед станцією «Сирець».

Біметалева контактна рейка.

Виріб складається з алюмінієвої струмопровідної основи і сталевого гнучого С-подібного профілю з підвищеними зносостійкими властивостями. Біметалічна контактна рейка має нижчий питомий опір (у

4 рази нижче, ніж у сталевій контактній рейці) і у 2,5 рази меншу масу, що дозволяє зменшити: втрати електроенергії, нагрівання контактної мережі, падіння напруги за довжиною; підвищити безпеку перевезення пасажирів; спростити обслуговування контактної мережі; виключити введення в експлуатацію резервних підстанцій та знизити витрати на їх обслуговування.

Біметалеві контактні рейки мають менший опір завдяки специфічній конструкції, що включає в себе два різні метали. Основна ідея полягає в тому, що кожен з цих металів має свої унікальні властивості, які сприяють зменшенню опору.

Висока електропровідність одного металу: один з металів, який використовується у біметалевій конструкції, має високу електропровідність, що сприяє плавному та ефективному перенесенню електричного струму через рейку.

Висока теплопровідність іншого металу: інший метал у складі біметалевої рейки має високу теплопровідність, що допомагає розсіювати тепло, що виникає під час передачі електричного струму, зменшуючи тим самим його втрати на теплове випромінювання.

Менша корозійна чутливість: метали, що використовуються у біметалевих рейках, мають вищу стійкість до корозії, що зменшує ймовірність утворення окислів на поверхні рейки, що може спричинити додатковий опір.

Ці фактори разом сприяють зниженню опору біметалевих контактних рейок, що робить їх більш ефективними з точки зору передачі електричного струму та зменшення енергетичних втрат. Економія електроенергії при використанні біметалевої рейки складе до 75 % порівняно зі сталевією рейкою (з урахуванням різниці в коефіцієнті нагрівання). При середніх значеннях постійного струму та при 18 годинах роботи рейок на день впродовж року тільки перехід на біметалеві рейки допоможе заощадити 13,2 млн кВт·год.

Також суттєва економія впливає в процесі експлуатації та обслуговуванні біметалевої контактної рейки порівняно зі сталевією. Біметалеві контактні рейки широко використовуються в усьому світі вже понад 40 років. За цей час в їхню конструкцію було внесено безліч змін, що дозволило усунути більшість проблем, пов'язаних з механічним з'єднанням алюмінієвого корпусу та смуги з нержавіючої сталі. Перехід до використання біметалевих контактних рейок у метрополітені виявляється дієвим та продуктивним кроком для досягнення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат. Менший опір біметалевих рейок сприяє зниженню витрат електроенергії, що є критичним фактором у забезпеченні енергоефективності та економії ресурсів. Це дозволяє метрополітену знизити свої експлуатаційні витрати та сприяє створенню більш стабільної та екологічно чистої системи громадського транспорту.

4. Результати

Потенціал електрозбереження розподілявся по структурі споживання електроенергії за ВЕД в регіонах відносно країни на прикладі м. Києва (табл. 2). Економія електроенергії в метрополітені враховує перехід до біметалевих рейок за умови будівництва двох нових станцій до 2030 р. та збільшення їх кількості до 2040 року ще на дві. В табл. 3 представлено потенціал електрозбереження в цьому регіоні, але без врахування релокації підприємств, оскільки зараз такі статистичні дані відсутні. Розрахунки наведені відносно 2020 р.

Таблиця 2. Прогнозний потенціал електрозбереження (ПЕЗ) в Україні до 2040 р., млн кВт·год

Показники, регіони	Прогнозний потенціал електрозбереження відносно 2017 р.				
	2020	2025	2030	2035	2040
Україна	2418,6	7021,2	11162,9	15175,7	20547,8
м. Київ (регіональний рівень)	137,4	399,0	634,4	862,4	1167,7
Метрополітен м. Києва (при заміні рейок, технологічний ПЕЗ)	-	-	13,2	13,2	26,4

Таблиця 3. Прогнозний потенціал електрозбереження в Україні до 2040 р. відносно 2020 р., перерахований з врахуванням ситуації після 2022 року, млн кВт·год*

Показники, регіони	Прогнозний потенціал електрозбереження відносно 2020 р.			
	2025	2030	2035	2040
Україна	1000,0	2800,0	6900,0	10350,0
м. Київ	56,8	159,1	392,1	588,2
Метрополітен м. Києва (при заміні рейок, технологічний ПЕЗ)	-	13,2	13,2	26,4

* - дані наведені за умови деокупації території регіонів до кінця 2025 року

5. Висновки

В результаті дослідження розвинено удосконалений комплексний метод попиту на енергоресурси в частині урахування особливостей енерговикористання м. Києва і його впливу на електроспоживання країни.

Обчислення потенціалів електрозбереження на регіональному рівні (м. Київ) дозволило більш точно врахувати обсяги впровадження заходів з енергозбереження, оскільки такі програми (в т. ч. електрозбереження) розробляються саме на регіональному рівні. Для технологічного потенціалу електрозбереження враховано характерні для міста енергозберігаючі заходи. При збереженні темпів розвитку економіки технологічний потенціал електрозбереження по країні до 2040 р. досягне 10,4 млрд кВт·год, в м. Київ – до 600 млн кВт·год.

Отже, перехід до використання біметалевих контактних рейок у метрополітені є обґрунтованим кроком для досягнення енергоефективності, економії ресурсів та поліпшення якості обслуговування пасажирів. Ця інновація відкриває нові можливості для сталого розвитку міського транспорту та сприяє створенню більш ефективних та зручних умов для мешканців міста.

Посилання

- Кулик М.М. Методи узгодження прогнозних рішень. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 2(37). С. 5—12. URL: <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/516> (дата звернення: 12.04.2024).
- Розен В.П., Демчик Я.М. Порівняльний аналіз методів прогнозування споживання електроенергії виробничих систем. *Вісник Криворізького національного університету. Зб. наук. праць*. 2016. Вип. 42. С. 41—47. URL: <http://visnykknpu.com.ua/wp-content/uploads/file/42/11.pdf> (дата звернення: 12.04.2024).
- Idowu S., Saguna S., Ahlund Ch., Schelen O. Forecasting Heat Load for Smart District Heating Systems: A Machine Learning Approach. *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)* (2014, November 03–06). <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2014.7007705>
- Лі Ч. Моделі прогнозування споживання електроенергії в КНР на довгострокову перспективу. *Вісник Одеського національного університету. Економіка*. 2016. Т. 21. Вип. 5(47). С. 26—32. URL: http://visnyk-onu.od.ua/journal/2016_21_5/06.pdf (дата звернення: 10.01.2023).
- Bansal A., Rompikuntla S. K., Gopinadhan J., Kaur A., Kazi Z. A. Energy Consumption Forecasting for Smart Meters. Bangalore, India, 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.05979>
- Kaytez F., Taplamacioglu M. C., Çam E., Hardalac F. Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 67. P. 431—438. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.036>
- Idowu S., Saguna S., Ahlund Ch., Schelen O. Applied machine learning: Forecasting heat load in district heating system. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 133. P. 478—488. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.068>
- Daut M. A. M., Hassan M. Y., Abdullah H., Rahman H. A., Abdullah M. P., Hussin F. Building electrical energy consumption forecasting analysis using conventional and artificial intelligence methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 1108—1118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.015>
- Li K., Zhang T. Forecasting Electricity Consumption Using an Improved Grey Prediction Model. *Information*. 2018. 9(8). <https://doi.org/10.3390/info9080204>
- Saloux E., Candanedo J. A. Forecasting District Heating Demand using Machine Learning Algorithms. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 149. P. 59—68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.169>
- Sun T., Zhang T., Teng Y., Chen Z., Fang J. Monthly Electricity Consumption Forecasting Method Based on X12 and STL Decomposition Model in an Integrated Energy System. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9012543>
- Country Energy Demand Forecast. URL: <https://www.enerdata.net/research/country-energy-demand-forecast.html> (дата звернення: 12.04.2024).
- Energy demand by region. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-region.html> (дата звернення: 12.04.2024).

14. Horskyi V.V., Maliarenko O.Ye., Teslenko O.I., Maistrenko N.Yu., Kuts H.O. Modified three-stage model for forecasting the demand for energy resources at various hierarchy levels of the economy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 1049. 012054. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012054>
15. Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Спітківський А.І. Застосування методу комплексного прогнозування для визначення перспективного попиту на енергетичні ресурси. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. Вип. 1(48). С. 5—15. <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.005>
16. Кулик М.М., Майстренко Н.Ю., Маляренко О.Є. Двоетапний метод прогнозування перспективного попиту на енергетичні ресурси. *Енерготехнології та ресурсосбереження*. 2015. № 5-6. С. 25—33. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/131184> (дата звернення: 12.04.2024).
17. Майстренко Н.Ю. Удосконалена чотирьохрівнева методика прогнозування рівнів енергоспоживання з урахуванням структурних зрушень в економіці. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. Вип. 3(50). С. 15—22. <https://doi.org/10.15407/pge2017.03.015>
18. Maistrenko N., Horskyi V. Assessment of the energy saving potential by regions of Ukraine (methodology and predictive assessment). *System Research in Energy*. 2024. № 1. P. 4—16. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.004>
19. Про енергетичну ефективність: Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/T211818?an=1> (дата звернення: 13.04.2024).
20. ДБН В.2.3-7:2018 Метрополітени. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074953152127042850?doc_type=2 (дата звернення: 13.04.2024).
21. Павленко Т.П., Лукашова Н.П. *Електропостачання транспорту: навч. посібник*. Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова, 2021. ISBN 978-966-695-547-3. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/61195/1/2020%20печ%208H%20Нав.пос.pdf> (дата звернення: 11.04.2024).
22. Кузнецов В.Г., Костюковский Б.А. Оценка потенциала энергосбережения систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока. *Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПИ»*. 2012. № 26. С. 109—116.
23. Годлевский В.А. *Электроснабжение подземных электрических метрополитенов*. Москва: Транспорт, 1982.
24. Сергиенко В.М. *Электроснабжение и управление метрополитенов*. Москва: Высшая школа, 1988.
25. Беляев В.В., Колмановский В.Б. *Автоматика и управление в метрополитене*. Москва: Энергия, 1974.
26. Грегорович Л.М. *Градостроительство и проектирование метрополитена*. Москва: Высшая школа, 1979.
27. Быков Е.И., Панин Б.В., Пунынин В.Н. *Тяговые сети метрополитенов*. Москва: Транспорт, 1987.
28. Колузаев А.М., Едигарян Л.С., Ермолов Д.Г. *Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование*. Москва: Транспорт, 1977.
29. Бабаєв М.М., Давиденко М.Г., Загарій Г.І. *Електротехніка та електромеханіка систем залізничної автоматики*. Харків: Укр. держ. акад. заліз. трансп., 2011. 604 с.
30. Чеканова Л.Г., Палант О.Ю., Кушнір Т.Б., Сидоренко Ю.В. Аналіз стану та перспективи розвитку міського наземного електричного транспорту. *Коммунальное хозяйство городов*. 2010. Вип. 92. С. 150—153.
31. Бесараб А.І., Бушма В.М., Калкаманов С.А. Основні напрямки модернізації тягових електричних машин постійного струму. *Комунальне господарство міст*. 2012. Вип. 103. С. 497—501.
32. Хворост М.В., Божко В.В. Система електротягового забезпечення підвищеної ефективності для метрополітенів. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 6. С. 79—86.
33. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В., Холод О.І. Енергоефективність систем електропостачання подвижного складу метрополітена. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С. 67—74.
34. Кирилюк Т.І. Способи підвищення ефективності електропоживання на залізницях України. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 8. С. 15—24.
35. Островерхов М.Я., Вещиков Г.В. Дослідження енергоефективності автономної роботи електротранспорту. *Вісн. Нац. техн. університету «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2023. № 3(15). С. 41—46. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.06>
36. *Правила улаштування електроустановок*. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/pravyly-ulashtuvannya-elektrostanovok>; URL: <https://enext.ua/upload/books/pueh-ukraina-2017.pdf> (дата звернення: 10.04.2024).

References

1. Kulyk, M.M. (2014). Features of input data usage in deterministic and stochastic life-cycle models. *The Problems of General Energy*, 2(37), 5—12. URL: <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/516> (Last accessed: 12.04.2024) [in Ukrainian].
2. Rosen, V.P., & Demchik, Y.M. (2016). Comparative analysis of methods of forecasting electricity consumption of production systems. *Journal of Kryvyi Rih National University. Coll. Science works*, 42, 41—47. URL: <http://visnykknpu.com.ua/wp-content/uploads/file/42/11.pdf> (Last accessed: 12.04.2024) [in Ukrainian].
3. Idowu, S., Saguna, S., Ahlund, Ch., Schelen, O. (2014, November 03—06). Forecasting Heat Load for Smart District Heating Systems: A Machine Learning Approach. *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2014.7007705>

4. Li, Ch. (2016). Models of forecasting of electricity consumption in China for the long term. *Odesa National University Herald. Economy*, 21, 5(47), 26–32. URL: http://visnyk-onu.od.ua/journal/2016_21_5/06.pdf (Last accessed: 10.01.2023) [in Ukrainian].
5. Bansal, A., Rompikuntla, S. K., Gopinadhan, J., Kaur, A., & Kazi, Z. A. (2015). Energy Consumption Forecasting for Smart Meters. Bangalore, India. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.05979>
6. Kaytez, F., Taplamacioglu, M. C., Çam, E., & Hardalac, F. (2015). Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.036>
7. Idowu, S., Saguna, S., Åhlund, Ch., & Schelén, O. (2016). Applied machine learning: Forecasting heat load in district heating system. *Energy and Buildings*, 133, 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.068>
8. Daut, M. A. M., Hassan, M. Y., Abdullah, H., Rahman, H. A., Abdullah, M. P., & Hussin, F. (2017). Building electrical energy consumption forecasting analysis using conventional and artificial intelligence methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1108–1118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.015>
9. Li, K., & Zhang, T. (2018). Forecasting Electricity Consumption Using an Improved Grey Prediction Model. *Information*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/info9080204>
10. Saloux, E., & Candanedo, J. A. (2018). Forecasting District Heating Demand using Machine Learning Algorithms. *Energy Procedia*, 149, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.169>
11. Sun, T., Zhang, T., Teng, Y., Chen, Z., & Fang, J. (2019). Monthly Electricity Consumption Forecasting Method Based on X12 and STL Decomposition Model in an Integrated Energy System. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2019/9012543>
12. Country Energy Demand Forecast. URL: <https://www.enerdata.net/research/country-energy-demand-forecast.html> (Last accessed: 12.04.2024).
13. Energy demand by region. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-region.html> (Last accessed: 12.04.2024).
14. Horskyi, V.V., Maliarenko, O.Ye., Teslenko, O.I., Maistrenko, N.Yu., & Kuts, H.O. (2022). Modified three-stage model for forecasting the demand for energy resources at various hierarchy levels of the economy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049, 012054. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012054>
15. Kulyk, M.M., Maliarenko, O.Ye., Maistrenko, N.Yu., Stanitsyna, V.V., & Spitkovskyi, A.I. (2017). Application of the method of complex forecasting for the determination of long-term demand for energy resources. *The Problems of General Energy*, 1(48), 5–15 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.005>
16. Kulyk, M.M., Maistrenko, N.Yu., & Malyarenko, O.Ye. (2015). Two-stage forecasting method of the future energy demand. *Energy Technologies & Resource Saving*, 5-6, 25–33. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/131184> (Last accessed: 12.04.2024) [in Ukrainian].
17. Maistrenko, N.Yu. (2017). Improved four-level methodology for forecasting the levels of energy consumption with regard for structural changes in the economy. *The Problems of General Energy*, 3(50), 15–22 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2017.03.015>
18. Maistrenko, N., & Horskyi, V. (2024). Assessment of the energy saving potential by regions of Ukraine (methodology and predictive assessment). *System Research in Energy*, 1(76), 4–16. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.004>
19. On energy efficiency: Law of Ukraine dated 21.10.2021 No. 1818-IX URL: <https://ips.ligazakon.net/document/T211818?an=1> (дата звернення: 13.04.2024) [in Ukrainian].
20. DBN V.2.3-7:2018 Metro stations. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074953152127042850?doc_type=2 (Last accessed: 13.04.2024) [in Ukrainian].
21. Pavlenko, T.P., & Lukashova, N.P. (2021). *Power supply of transport: textbook*. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ISBN 978-966-695-547-3 URL: <https://eprints.kname.edu.ua/61195/1/2020%20печ%208H%20Нав.пос.pdf> (Last accessed: 11.04.2024) [in Ukrainian].
22. Kuznetsov, V.G., & Kostyukovsky, B.A. (2012). Assessment of the energy saving potential of DC train traction power supply systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 26, 109–116 [in Russian].
23. Godlevsky, V.A. (1982). *Power supply of underground electric subways*. Moscow: Transport [in Russian].
24. Sergienko, V.M. (1988). *Power supply and management of subways*. Moscow: Higher School [in Russian].
25. Belyaev, V.V., & Kolmanovsky, V.B. (1974). *Automation and control in the subway*. Moscow: Energia [in Russian].
26. Grigorovich, L.M. (1979). *Urban planning and metro design*. Moscow: Higher School [in Russian].
27. Bykov, E.I., Panin, B.V., & Pupynin, V.N. (1987). *Traction networks of subways*. Moscow: Transport [in Russian].
28. Koluzaev, A.M., Yedigaryan, L.S., & Ermolov, D.G. (1977). *Electricity supply of subways. Device, operation and design*. Moscow: Transport [in Russian].
29. Babaev, M.M., Davydenko, M.G., & Zagariy, G.I. (2011). *Electrical Engineering and electromechanics of railway automation systems*. Kharkiv: Ukrainian State Academy of Railway Transport (604 p.) [in Ukrainian].
30. Chekanova, L.G., Palant, O.Y., Kushnir, T.B., & Sidorenko, Y.V. (2010). I will analyze the prospects for the development of a small ground electric transport. *Communal economy of cities*, 92, 150–153 [in Ukrainian].
31. Bessarab, A.I., Bushma, V.M., & Kalkamanov, S.A. (2012). The main directions of modernization of DC traction electric machines. *Communal economy of cities*, 103, 497–501 [in Ukrainian].

32. Khvorost, M.V., & Bozhko, V.V. (2006). System of electric traction support of increased efficiency for subways. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 6, 79–86 [in Ukrainian].
33. Zhemerov, G.G., Tugay, D.V., & Kholod, O.I. (2014). Energy efficiency of power supply systems for a subway. *Technical Electrodynamics*, 1, 67–74 [in Russian].
34. Kirilyuk, T.I. (2012). Ways for improving the energy consumption on the railways of Ukraine. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 8, 15–24 [in Ukrainian].
35. Ostroverkhov, M.Ya., & Veschikov, G.V. (2023). Research of energy efficiency of autonomous operation of electric transport. *Bulletin of the National Technical University "KhPI": Power and heat engineering processes and equipment*, 3(15), 41–46 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.06>
36. *Rules for electrical installations*. (2017). Kharkiv: Publishing House "Fort" (760 p.). URL: <https://mev.gov.ua/storinka/pravyla-ulashtuvannya-elektroustanovok> <https://enext.ua/upload/books/pueh-ukraina-2017.pdf> (Last accessed: 10.04.2024) [in Ukrainian].

ENERGY SAVING MEASURES IN THE METRO (ON THE EXAMPLE OF BIMETALLIC CONTACT RAILS)

Natalia Maistrenko*, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1757-1665>
Igor Klimuk

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., 03150, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: maistrenkonatalia27@ukr.net

Abstract. *The purpose of this study is to develop methods and tools for long-term forecasting of electricity consumption based on an improved integrated method for predicting electricity demand, taking into account the peculiarities of electric use of the Kyiv Metro and its impact on the city's electricity consumption. The scientific novelty of the results obtained is the consideration of technological potential with measures for electric saving, pouring into Level II and Level III in the energy consumption model, which takes into account both the overall potential of electric saving (from structural and technological shifts) in the country as a whole, and the features at the regional level (the city of Kyiv) in the types of economic activity in the provision of transport services (Metro). During the work, material was collected on measures for electricity saving in the metro and forecasts for the development of this type of service provision (passenger transportation). To achieve sufficient energy consumption, it is important to introduce energy-efficient technologies that will reduce electricity costs without losing productivity and passenger service quality. Bimetallic contact rails are more efficient in terms of transmitting electric current and reducing energy losses. This innovation opens up new opportunities for the sustainable development of urban transport and contributes to the creation of more efficient and convenient conditions for city residents. Measures are provided to protect the structures and equipment of the section that is being designed and built, the metro line from electric corrosion. Calculation of electricity saving potentials at the regional level (Kyiv) made it possible to more accurately take into account the volume of implementation of energy saving measures, since such programs are developed at the regional level. These estimates are used to determine the technological potential of energy saving. The technological potential of electricity saving will reach the level of 600 million kWh by 2040, while maintaining the pace of economic development in Kyiv.*

Keywords: Metro, electric saving, electric saving potential, forecasting, energy efficiency, electricity.

Надійшла до редколегії: 06.05.2024