

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

УДК 621.006.354

С. Д. БІТЮКОВ¹, В. Г. КУЗНЕЦОВ², канд. техн. наук, **В. Г. СИЧЕНКО²**, канд. техн. наук
¹Донецька залізниця, м. Донецьк; ²Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В.І. Лазаряна, м. Дніпропетровськ

ОПТИМІЗАЦІЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОМЕРЦІЙНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Запропоновано нову постановку задачі керування та наведено результати оптимізації напруги на шинах тягових підстанцій Донецької залізниці.

Ключові слова: тягова підстанція, напруга, автоматизована система комерційного обліку електроенергії

За витратами паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) на одиницю транспортної продукції залізничний транспорт, який забезпечує переважну більшість обсягів перевезень у державі, є найбільш економічним. З точки зору енергозбереження є величезний резерв в оптимізації споживання енергоресурсів як на самому залізничному транспорті, так і у підрозділах інфраструктури, тією чи іншою мірою причетних до перевезень. З цих позицій простежується дуже широкий спектр напрямків, де залізничники можуть оптимізувати своє енергоспоживання. Серед найбільш важливих пріоритетних завдань енергетичної стратегії Укрзалізниці необхідно відзначити такі:

повне і надійне забезпечення процесу перевезень, зниження ризиків і недопущення розвитку кризових явищ в енергозабезпеченні залізничного транспорту;

значне зниження питомих витрат ПЕР в усіх сферах діяльності Укрзалізниці: тяга поїздів, інфраструктура, ремонт, виробництво;

оптимізація енергетичних затрат у стаціонарній енергетиці;

докорінне покращення структури управління енергетичним комплексом Укрзалізниці на основі сучасних інформаційних технологій;

гармонійне й ефективне входження Укрза-

лізниці в енергетичний ринок держави при недискримінаційних економічних взаємовідносинах між його суб'єктами;

мінімізація техногенного впливу залізничної енергетики на оточуюче середовище держави.

Енергоресурси на залізничному транспорті витрачаються в основному на процес перевезень, а також для забезпечення роботи інфраструктури, що обслуговує перевезення, ремонтне виробництво, соціальну сферу і т. д. Приблизно 60 % усіх видів енергоресурсів припадає на електроенергію. Орієнтація залізничного транспорту, головним чином на електроспоживання, збігається із загальною спрямованістю енергетики країни. Одним з енергозберігаючих заходів у господарствах електропостачання залізниць є керування режимами системи електропостачання.

На електрифікованих дільницях залізниць України вже накопичено певний досвід експлуатації пристроїв регулювання напруги з урахуванням впливу зміни напруги у тяговій мережі на витрату електроенергії, зміну струмів у контактній мережі та технічну швидкість руху поїздів. Напруга на шинах тягової підстанції залежить не тільки від величини тягового навантаження, яке носить стохастичний характер, а й від зміни навантаження нетягових споживачів й відхилення напруги живильної енергосистеми. Тому при одному й тому самому тяго-

© С.Д. БІТЮКОВ, В.Г. КУЗНЕЦОВ, В.Г. СИЧЕНКО, 2011

вому навантаженні напруга на шинах 3,3 кВ може бути різною, тобто немає однозначної залежності між величиною тягового струму і напругою на шинах 3,3 кВ. Дослідженнями також встановлено, що для більш високої напруги на струмоприймачі збільшується нерівномірність ведення потягу та питомо витрата електроенергії. Таким чином, можна стверджувати, що рівень напруги на шинах тягового навантаження в кожний момент часу повинен розглядатися як деякий узагальнений параметр, що оптимізує передачу та споживання енергії для електрорухомого складу і залежить від зміни впливаючих факторів [2]. Такий підхід потребує удосконалення наукових основ регулювання напруги.

Досвід експлуатації свідчить, що у тяговій мережі системи електропостачання постійного струму протікають значні зрівняльні струми. З появою автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) на залізницях України з'явилися умови для поліпшення моніторингу та управління рівнями напруг на шинах тягових підстанцій.

Метою даної статті є демонстрація можливостей управління режимами системи тягового електропостачання на основі інформації від АСКОЕ.

На початок 2010 року до АСКОЕ Донецької залізниці входить приблизно 1400 приладів на точках обліку, половина з яких ведуть комерційний облік електроенергії на території п'яти дистанцій електропостачання й чотирьох суміжних енергопередавальних компаній. База даних системи налічує понад 1400 точок обліку з технічною інформацією про прилади обліку. Дорожньою цифровою мережею передачі даних охоплено 42 тягові підстанції, 9 будинків дистанцій електропостачання та диспетчерська АСКОЕ в Управлінні залізниці.

Математична постановка задачі управління режимами системи тягового електропостачання

Математична постановка задачі управління режимами системи тягового електропостачання полягає у такому. Є математична модель системи електропостачання постійного струму, що має N підстанцій, які живлять лінійну ділянку тягової мережі. Для виконання процедури оптимізації у моделі виділено цільову функцію, яка за фізичним сенсом є сумою зведених витрат на перевезення вантажів:

$$C = \min \left[\sum_{m=1}^T C_e(t_m) t_m \left(\sum_{i=1}^{N-1} (\Delta P_{Ti} + \Delta P_{yi} + P_i) + \sum_{i=1}^N \Delta P_{Pi} \right) + Y \right], \quad (1)$$

де $C_e(t)$ – вартість електроенергії, що витрачається на перевезення вантажів; ΔP_{Ti} – втрати потужності в тяговій мережі i -ї зони без урахування зрівняльних струмів; ΔP_{yi} – втрати потужності у тяговій мережі i -ї зони, викликані нерівністю ЕРС підстанцій; P_i – потужність, яка споживається електровозом на i -й міжпідстанційній зоні; ΔP_{Pi} – втрати потужності в устаткуванні i -ї тягової підстанції [2]; Y – збиток, що враховує ненадійність трансформаторів та перемикаючих пристроїв; T – період часу, за який визначаються витрати; t_m – m -й інтервал часу.

Виділимо фактори, які зумовлюють техніко-економічну ефективність визначення раціональних режимів:

урахування реального технічного стану регулювальних пристроїв;

необхідність контролю й оцінки поточного стану систем у процесі для зіставлення їх з оптимальним станом;

можливість аналізу раціональних станів на чутливість.

Можливості управління режимами електроспоживання у тягових мережах електрифікованих залізниць постійного струму в апаратному плані нині достатньо обмежені: застосовуються трансформатори з регулюванням під напругою (РПН) та випрямлячі з вольто-додатковими пристроями. Розглянемо обладнання РПН, яке використовується у системі електропостачання електричного транспорту. Імовірність безвідмовної роботи обладнання РПН залежить від надійності тих елементів, які визначають його безпосереднє функціонування. З погляду фізики відмов, до них можна віднести регулювальну обмотку, обмотку контактора й обмотку струмообмежуючих пристроїв, контактну систему, механічні деталі й вузли. Для безвідмовної роботи пристроїв регулювання напруги необхідно, щоб усі перераховані елементи перебували у робочому стані, що з погляду на надійність відповідає їх послідовному з'єднанню. Тоді ймовірність безвідмовної роботи регулювальних пристроїв на деякому інтервалі часу можна представи-

ти як добуток функцій надійності відповідних вузлів:

$$p_{\text{РПН}} = p_{\text{об}} \cdot p_{\text{конт}} \cdot p_{\text{мех}}, \quad (2)$$

де $p_{\text{об}}$, $p_{\text{конт}}$, $p_{\text{мех}}$ – імовірності безвідмовної роботи обмоток, контактної системи й механічних деталей відповідно.

Для визначення показників надійності обладнання РПН із метою урахування його у моделі оперативної корекції режиму системи електропостачання необхідно встановити зв'язок між швидкістю зношування і фізичними характеристиками елементів, з одного боку, і режимами функціонування регульовального обладнання, з іншого боку. З урахуванням викладених міркувань і даних, наведених у роботах [6, 8–10], інтенсивність відмов визначається таким способом:

$$\lambda_k = -\frac{a_0 \cdot B \cdot n}{\sigma_I \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(R - \bar{R})^2}{2\sigma_I^2}\right]; \quad (3)$$

$$B = \frac{\Delta P_k}{\Delta n}; \quad R = \ln\left(\frac{I_k}{I_{\text{св}}}\right),$$

де ΔP_k – зменшення контактного зусилля при кількості включень n ; a_0 – емпіричний коефіцієнт, який залежить від матеріалу й конструкції контактів; n – загальна кількість включень; I_k – величина струму у момент замикання кола; σ_I , R – параметри розподілу випадкової величини R .

Ефективність розв'язку задачі оптимального керування станами електричної системи багато у чому залежить від використаного ресурсу трансформаторів [3]. З цією метою розробляються системи діагностики, одним із завдань яких є визначення використаного ресурсу трансформаторів [7]. За основу вимірювань використаного ресурсу береться повний інтеграл на базі формули Монтзінгера, яка визначає відносне зношування ізоляції за конкретний період часу:

$$H_B = \int_0^{t_p/c} L(t) \cdot dt = \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} L_i \cdot \Delta t_i = \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} 2 \frac{V_i - 98}{6} \cdot \Delta t_i = \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} \exp(0,1155(V_s - 98)) \cdot \Delta t_i, \quad (4)$$

де L_i – відносний використаний ресурс за елементарний інтервал часу Δt_i ; t_p – напрацювання установки; c – одиниця виміру використаного ресурсу й часу, доба; n – число елементарних інтервалів часу, на які розбивається доба; V_i –

температура найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора при i -му вимірі. Виходячи зі сказаного вище, інтенсивність відмов буде визначатися таким виразом:

$$\lambda_{\text{вп}} = \frac{\Delta t_0}{\sigma_{\Delta t} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta t - \bar{\Delta t})^2}{2\sigma_{\Delta t}^2}\right] \times \exp(0,1155(V_s - 98)). \quad (5)$$

Крім того, під час регулювання режимів системи тягового електропостачання можливо здійснювати контроль потенціалів залізобетонних опор контактної мережі для визначення ймовірності їх корозії. Іншими словами, при визначенні U необхідно враховувати збиток від корозійного руйнування опор. У роботах [4, 5] показано необхідність урахування потенційного стану опор контактної мережі під час визначення раціональних рівнів напруги на шинах тягових підстанцій.

Слід зазначити, що до складу цільової функції введено лише ті параметри, які залежать від рівнів напруги на підстанціях та від схеми живлення ділянки. На відміну від попередніх досліджень [10], у цільовій функції вартість електроенергії залежить від часу, що дає можливість розрахувати раціональні режими при диференційованих тарифах та під час розрахунків за електроенергію по оптових цінах. Крім (1), що описує зведені витрати, математичну модель оптимізації складають рівняння, що описують взаємозв'язок між параметрами системи. Оптимізація повинна виконуватися на допустимій безлічі положень РПН трансформаторів, яка утворюється з безлічі всіх положень перемикачів, без тих положень РПН, які не забезпечують необхідного рівня напруги у нетягових споживачів. Якщо ж тягові підстанції обладнані вольтододатковими пристроями, то діапазон регулювання може бути безперервним. Стабілізація напруги на шинах тягової підстанції на рівні 3,3 кВ, а також її регулювання з метою забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачах електрорухомого складу дає змогу покращити якість електропостачання, підвищити швидкість руху на міжпідстанційній ділянці і тим самим підняти пропускну і провізну здатність ліній, електрифікованих на постійному струмі.

АСКОЕ і регулювання режимів системи тягового електропостачання

На базі приведеної математичної моделі, інформації від АСКОЕ оперативний персонал

дистанцій електропостачання може вживати заходів щодо корегування режимів системи тягового електропостачання.

Так, наприклад (див. рис. 1 і 2), на Червоноармійській дистанції електропостачання були нерівномірно завантажені суміжні тягові підстанції Вдала – Красноармійськ – Бажана (добові витрати в 2009 році були 39,76 і 52 тис. кВт·год відповідно), у 2010 році було проведено (після вимірів зовнішніх характеристик тягових під-

станцій і визначення рівня напруги на шинах 3,3 кВ) перемикання анцапф тягових трансформаторів, що дозволило оптимізувати витрати електроенергії й напруги на шинах тягових підстанцій (добові витрати стали 51,75 і 60 тис. кВт·год відповідно). Загальна витрата електроенергії на тягу по ЕЧ у лютому 2010 р. становила 10,889 млн кВт·год проти 11,363 млн кВт·год у лютому 2009 р. Було зафіксовано зниження споживання електроенергії на 474 тис. кВт·год.

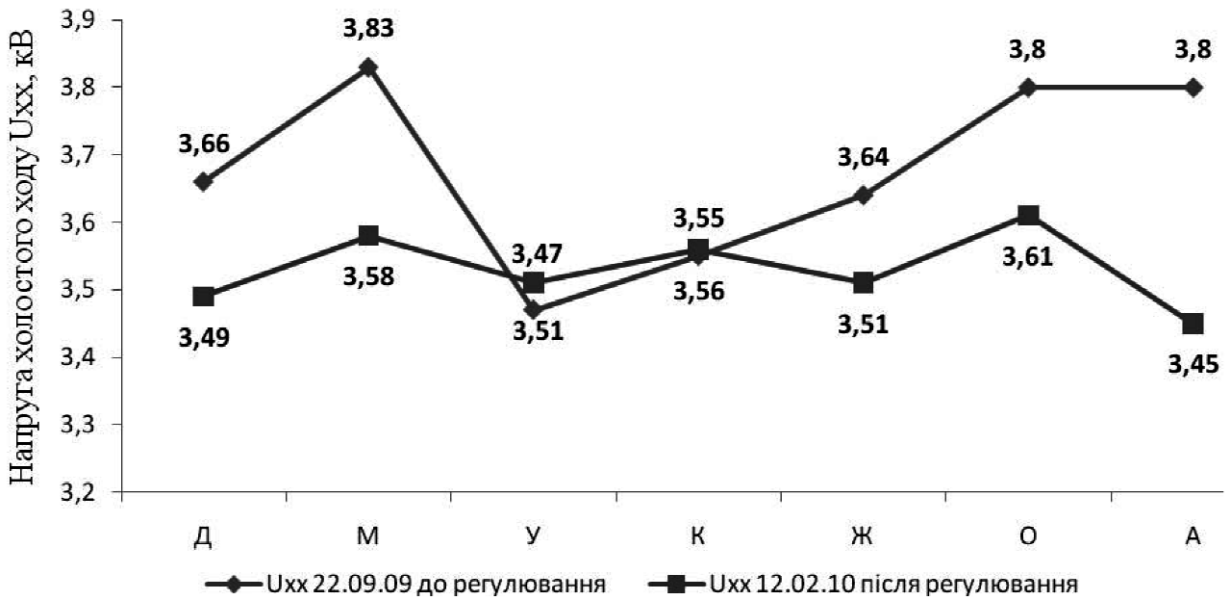


Рис. 1. Напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій до і після регулювання

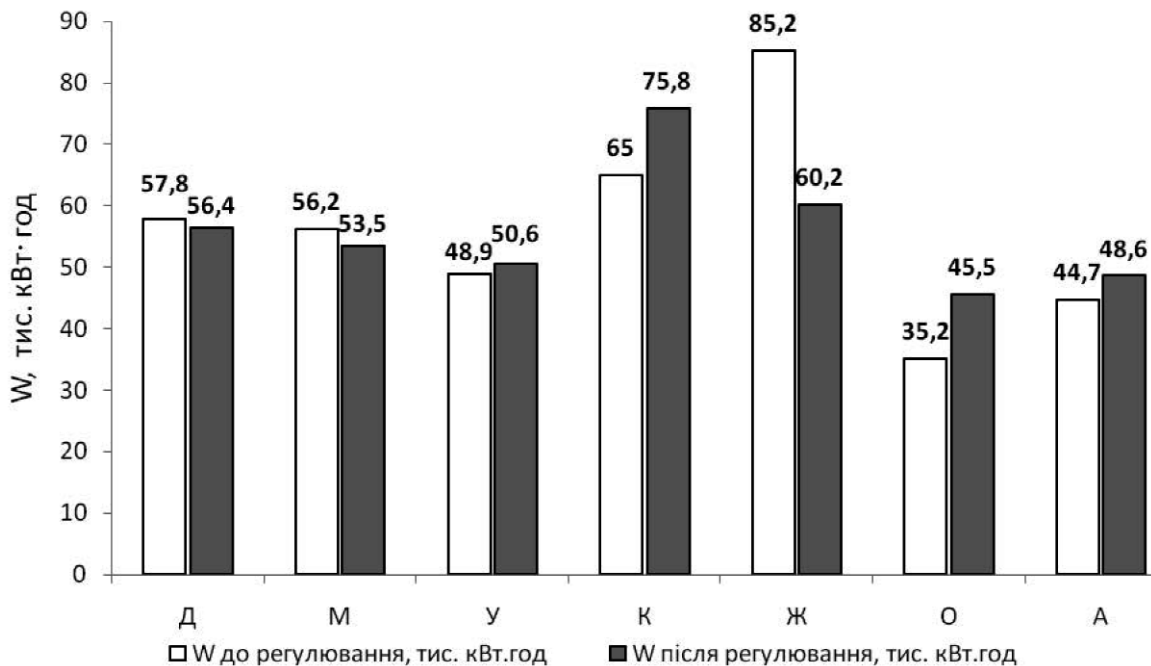


Рис. 2. Витрати електроенергії тягових підстанцій до і після регулювання напруги на шинах підстанцій

Аналіз графіків витрат електроенергії на тягу поїздів у зимовий період за допомогою системи АСКОЕ виявив залежність витрати електроенергії на тягу поїздів не тільки від обсягу перевезень, а й від коливань температу-

ри навколишнього повітря. Так, при зниженні температури зростає витрата електроенергії на тягу при тих самих обсягах перевезення (див. рис. 3 і 4). Очевидно, це відбувається внаслідок підвищення споживання електроенергії на опа-

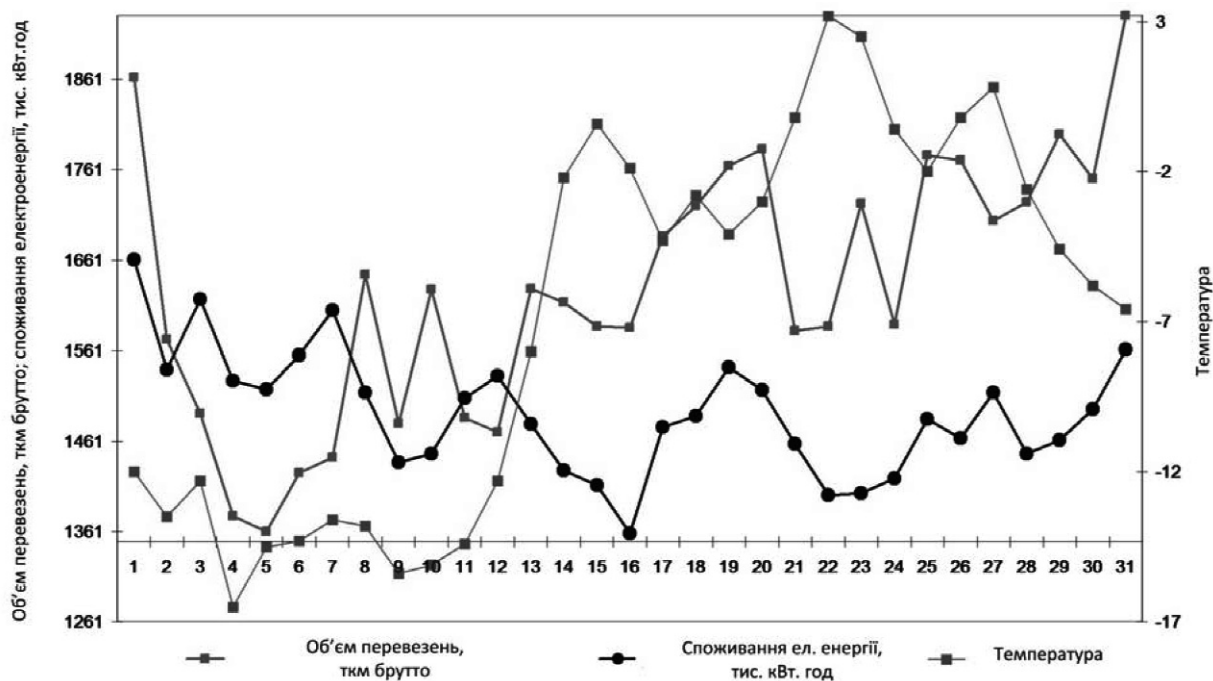


Рис. 3. Залежність витрат електроенергії на тягу поїздів від обсягів перевезень і температури по дистанції електропостачання "Ч" за січень 2008 р.

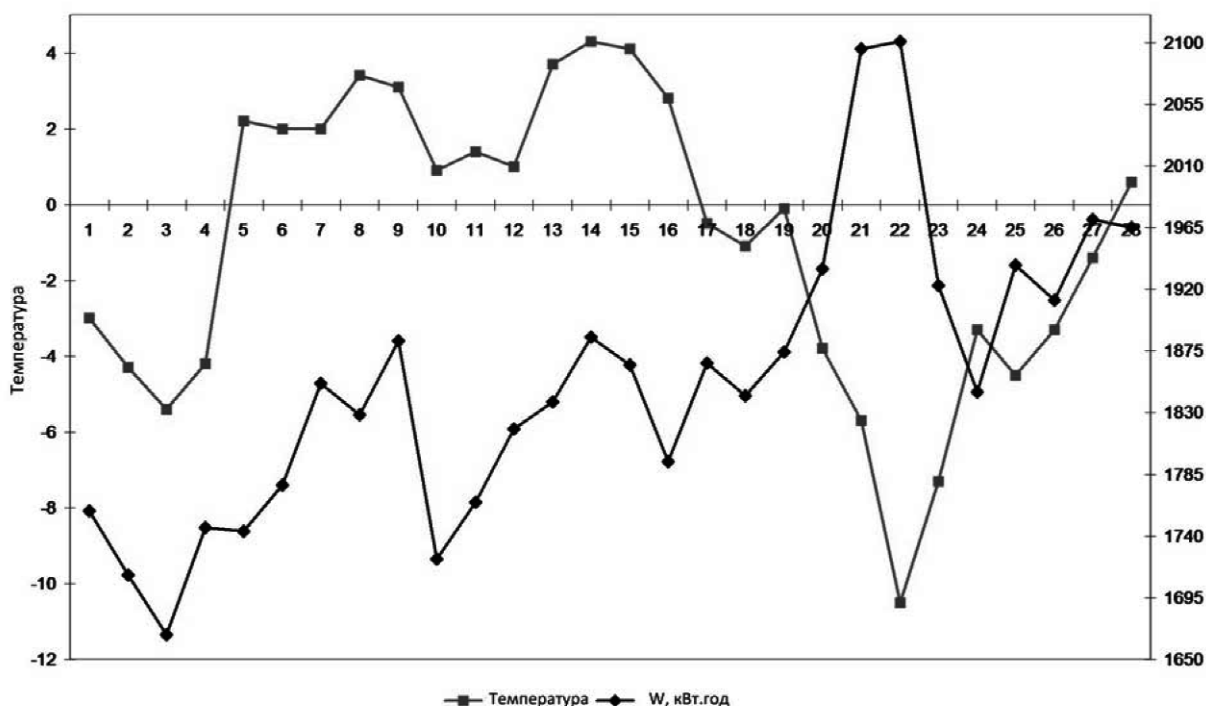


Рис. 4. Залежність витрат електроенергії на тягу поїздів від температури на дистанції електропостачання "Ч" у лютому 2009 р.

лення пасажирських вагонів, електропоїздів і електровозів. Необхідно проводити окремий облік на електрообігрів, а також привести облік електроенергії на ЕРС у відповідність із вимогами часу – установлювати електронні лічильники, робити їх перевірку.

ВИСНОВКИ

У системах електропостачання залізниць існують значні резерви для зниження втрат потужності за рахунок впровадження раціональних режимів системи тягового електропостачання.

Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії можуть виконувати не тільки свої класичні функції, а й створювати умови для керування режимами в системах електропостачання електрифікованого транспорту.

Запропонована цільова функція для задачі керування режимами системи електропостачання електрифікованого транспорту, що відрізняється врахуванням залежності тарифу за спожиту електроенергію від часу, а також врахуванням надійності переключаючих пристроїв, трансформаторів та опор контактної мережі.

Проведені на Донецькій залізниці експериментальні дослідження свідчать, що на основі математичної моделі, наведеної вище, з застосуванням інформації від АСКОЕ можна вирішувати задачу з керування режимами системи електропостачання електрифікованого транспорту. Зафіксовано зниження споживання електроенергії по Червоноармійській дистанції електропостачання на 474 тис. кВт·год за лютий 2010 р. порівняно з лютим 2009 р. при приблизно однакових обсягах перевізної роботи.

1. *Збірник* типових енергоощадних заходів в електроенергетиці. ЦЕ-008 / Розроб. В. М. Мамалига. – К.: Мін-во трансп. України. Держ. адмін. заліз. трансп. України. Укрзалізниця, 2007. – 100 с.

2. *Сыченко В.Г.* Адаптивное микропроцессорное регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1992. – 24 с.
3. *Ветлугин Е.М., Урманов Р.Н.* Плавное регулирование напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой с помощью дросселей насыщения // Труды ин-та УЭМИИТ. – 1962. – № 5. – С. 44–45.
4. *Мельников Н.А.* Электрические сети и системы. – М.: Энергия, 1975. – 462 с.
5. *Сегеда М.С.* Электричні мережі та системи. – Львів: Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2009. – 488 с.
6. *Коллакот Р.* Диагностика повреждений. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
7. *Порудоминский В.В.* Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – М.: Энергия, 1974. – 287 с.
8. *Кузнецов В.Г., Кирилюк Т.И.* Дослідження впливу величин напруг на шинах тягових підстанцій на корозійний стан опор контактної мережі // Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник. – 2010. – № 84. – С. 38–45.
9. *Кузнецов В.Г., Калашников К.А.* Проблемы оптимизации напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока // Труды международной научно-практической конференции “Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство”. – Ростов на Дону: РГУПС, 2009. – С. 363–364.
10. *Сыченко В.Г.* Выбор управляющего параметра при разработке микропроцессорной адаптивной системы регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции // Межвузовский сборник научных трудов. Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта. – Днепропетровск: Сич, 1999. – С. 166–172.

Надійшла до редколегії: 07.04.2011