

с 12

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

САБЛІН ОЛЕГ ІГОРОВИЧ



УДК 621.313.333

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2009

✓

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Костін Микола Олександрович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України,
завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гетьман Геннадій Кузьмич,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України,
завідувач кафедри електрорухомого складу;

кандидат технічних наук, доцент
Рухлов Артем Володимирович,
Національний гірничий університет Міністерства освіти та науки України, м. Дніпропетровськ,
доцент кафедри систем електропостачання.

на засіданні спеціалізо-
національному універ-
на за адресою: 49010,

петровського націона-
іка В. Лазаряна.

М.Б. Курган

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На даний час близько 50,2 % магістральних електричних залізниць України електрифіковані за системою електричної тяги постійного струму. Увесь міський, шахтний та кар'єрний електричний транспорт також живиться постійною напругою. При цьому серед споживачів енергоресурсів електричний транспорт є однією з найбільш енергоємних галузей України. Тільки «Укрзалізниця» щорічно витрачає на власні потреби від 4,4 до 4,7 % загального обсягу електроенергії, що відпускається в мережі споживачів України. З усієї споживаної «Укрзалізницею» електроенергії 80...84 % використовується безпосередньо на електротягу поїздів, 15...19 % – на експлуатаційно-виробничі потреби і близько 1 % – на комунально-побутові потреби залізниць. Тобто, головним споживачем електроенергії в енергомережах електрифікованого транспорту є основні пристрої електричної тяги – електрорухомий склад (ЕРС).

У зв'язку з вищевикладеним, постійним зростанням полігона електрифікованих ліній та значним щорічним підвищенням тарифів на електричну енергію, істотно зростає актуальність питання енергозбереження на електричному транспорті. Тому відповідно до Закону України «Про енергозбереження» (№ 74/94-ВР, липень, 1994 р.), у якому визначені пріоритетні напрямки державної політики у сфері енергозбереження, «Укрзалізницею» в червні 1996 р. була розроблена «Програма енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996-2010 р.» У ній підкреслюється, що організаційні заходи щодо економії електроенергії належного ефекту вже не дають, необхідні подальший розвиток і впровадження енергозберігаючих технологій. Зокрема, у системах електричної тяги основними заходами таких технологій є: удосконалювання електротягових систем і режимів їх роботи; оцінка перетікань потужностей і підвищення якості електроенергії; оптимізація типорозмірного ряду потужностей електроустаткування ЕРС та тягових підстанцій; упровадження пристроїв компенсації реактивної потужності та ін. Зазначені заходи щодо ефективності електроспоживання в системі електричної тяги постійного струму частково розроблялися і впроваджувалися у ряді робіт, де питання електроспоживання вирішувалися за критеріями витрати і вартості активної електроенергії. Однак з економічної точки зору не менш важливим критерієм ефективності електроспоживання електротранспорту є також втрати електроенергії в його елементах, що залежать від режиму електроспоживання, активної і неактивної потужності, вищих гармонік і багато в чому визначаються формою і характером коливань напруги і струму. А оскільки, регулювання в широкому діапазоні потужності ЕРС, а також суттєва нерівномірність електроспоживання викликають безупинні різкозмінні технологічні коливання напруги на струмоприймачі та тягового струму ЕРС, то ігнорування цих факторів при розв'язанні задач енергозбереження в системі електричної тяги постійного струму призводить до неточної оцінки величин енергетичних показників ЕРС і якості електроспоживання, що виявляється у виді непродуктивних (додаткових) втрат і неточному обліку витрат електроенергії.

Отже, розробка енергозберігаючих технологій, що забезпечують ефективне

415517

електроспоживання ЕРС постійного струму з врахуванням зазначених реальних факторів зміни напруги і струму, є актуальною задачею теоретичних і практичних досліджень в області електричного транспорту. З економічної точки зору найбільш важливою комплексною проблемою підвищення ефективності використання електроенергії в процесі перевезень на залізничному транспорті і якості електропостачання є задача оцінки і зниження якраз втрат електроенергії в кожній підсистемі електричної тяги, тобто на ЕРС і в пристроях електропостачання, що й підкреслено у п. 4 зазначеної Програми енергозбереження на залізничному транспорті. Це й зрозуміло з огляду на те, що ці втрати досягають ~ 15 % споживаної чи переданої потужності, зниження їх навіть на 1 % у край важливо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Робота виконана відповідно до головних напрямків «Програми енергозбереження на залізничному транспорті на період 1996-2010 р.р.», розробленої «Укрзалізницею» у червні 1996 р. і згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 480 від 26.09.93 р. «Про розробку і виробництво в 1993-2000 роках магістральних вантажних і пасажирських електровозів», у якій передбачено, що Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна бере участь у теоретичних дослідженнях і випробуваннях електровозів.

Матеріали дисертаційної роботи є також складовими досліджень за координаційним планом Наукової Ради НАН України по комплексній проблемі «Наукові основи електроенергетики» по науковому напрямку «Розробка та удосконалення пристроїв і систем електричного транспорту» (тема по ДР № 0103U005112).

Мета роботи. Підвищення ефективності електроспоживання електрорухомого складу системи тяги постійного струму за рахунок зниження непродуктивних втрат електроенергії, визначених на основі досліджень балансу реальних електроенергетичних процесів, що протікають у силових тягових колах.

Задачі досліджень.

1. Встановити кількісні імовірісно-статистичні закономірності коливань напруги на струмоприймачі і тягового струму різних видів ЕРС постійного струму. Визначити величини амплітуд і частот коливань, що вносять основний вклад у статистичну динаміку спектрів випадкових процесів.
2. Адаптувати методи визначення потужностей і енергетичних показників ЕРС постійного струму при стохастичних електроенергетичних процесах у силових тягових колах.
3. Встановити залежності неактивної складової повної потужності ЕРС постійного струму від ступеня коливань тягового навантаження в умовах реальної експлуатації і скласти баланс електроенергетичних процесів у силових тягових колах.
4. Визначити рівень додаткових (непродуктивних) втрат активної потужності в силових колах ЕРС постійного струму від спотворення тягового струму і недовикористання встановленої потужності ЕРС.
5. Запропонувати та обґрунтувати нові додаткові критерії ефективності електроспоживання ЕРС.
6. Запропонувати конструктивні та експлуатаційно-технічні методи і підходи зниження непродуктивних втрат активної енергії в силових колах ЕРС.

Об'єкт досліджень – електроенергетичні процеси в силових тягових колах ЕРС постійного струму в умовах експлуатації.

Предмет досліджень – енергетичні показники та ефективність електроспоживання ЕРС постійного струму.

Методи досліджень. Для оцінки імовірнісних та спектральних характеристик напруги на струмоприймачі і тягового струму ЕРС застосовували методи теорії ймовірностей і математичної статистики, а періодичні складові у вказаних випадкових процесах визначали методами кореляційного і спектрального аналізу теорії випадкових процесів. Розрахунок експлуатаційних енергетичних показників ЕРС за даними моніторингу коливань напруги на струмоприймачі і тягового струму здійснювали за допомогою методів теоретичної електротехніки та теорії електричної тяги. Складові повної потужності і коефіцієнт потужності ЕРС визначали за методами: миттєвих потужностей, класичним та інтегральним.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Одержали подальший розвиток і вперше адаптовані до систем електричного транспорту постійного струму поняття і методи оцінки неактивної потужності і коефіцієнта потужності, що дозволило на більш точному рівні проаналізувати енергопроцеси у силових тягових колах ЕРС в залежності від режиму керування (ведення поїзда), а також характеру зміни напруги на струмоприймачі і тягового струму електрорухомого складу.
2. Теоретично обґрунтовано методи визначення й отримано аналітичні вирази потужностей і енергетичних показників ЕРС постійного струму, які відрізняються від існуючих методів і виразів врахуванням стохастичного характеру зміни напруги на струмоприймачі і тягового струму, що дозволило більш точно оцінити енергобаланс у силових колах ЕРС.
3. Вперше в спектрах випадкових функцій напруги на струмоприймачі і тягового струму встановлено закономірності появи низькочастотних періодичних коливань (інтергармонік), які генеруються різкозмінними нестационарними нелінійними навантаженнями ЕРС і обумовлюють непродуктивні (додаткові) втрати електроенергії в їхніх тягових колах.
4. Отримано залежності величини непродуктивних втрат активної потужності в силових тягових колах ЕРС від характеру коливань напруги на струмоприймачі і тягового струму, які обумовлені режимом ведення та масою поїзда, профілем залізничної колії і кваліфікацією машиніста.
5. Запропоновано критерії ефективності електроспоживання ЕРС, які відрізняються від існуючих критеріїв врахуванням реальних електроенергетичних процесів, що призводить до більш точних методів розрахунку оптимальних тягових режимів ведення поїздів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Уведене поняття коефіцієнта потужності ЕРС постійного струму дає можливість виконати на більш точному рівні оцінку енергетичних процесів у силових тягових колах різних видів ЕРС з урахуванням нестационарних експлуатаційних режимів роботи.
2. Визначення енергетичних показників ЕРС постійного струму з врахуванням реальних енергетичних процесів у силових колах за запропонованими мето-

- диками дозволяє більш точно оцінити непродуктивні втрати електроенергії при коливаннях навантаження, а також від недовикористання встановленої потужності тягового засобу в умовах експлуатації.
3. Здійснення технологічного процесу ведення поїзда з урахуванням запропонованих критеріїв ефективності електроспоживання дозволить знизити рівень втрат електроенергії в силових колах ЕРС у середньому на 11...16 %.
 4. Регулювання встановленої потужності оперативним вимиканням необхідної кількості тягових двигунів в експлуатації дозволяє зменшити надлишкову потужність ЕРС із дискретним регулюванням потужності, а також поліпшити форму тягового струму, що, у свою чергу, призводить до підвищення коефіцієнта потужності ЕРС на 7...10 %.
 5. Розроблені заходи щодо підвищення енергетичних показників ЕРС постійного струму в експлуатації прийняті до використання в Державному підприємстві «Дніпропетровський науково-виробничий комплекс «Електровозобудування» і в локомотивному депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці, а також можуть бути використані на всіх видах електричного транспорту постійного струму.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети і задачі досліджень виконано разом з науковим керівником. У публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації і які написані в співавторстві, автору дисертації належить: у [1, 2] – імовірісно-статистичний аналіз величин потужностей і коефіцієнта потужності електровоза ДЭ1; [8] – визначення чисельних значень втрат активної потужності в силових колах електровоза ВЛ8 від реактивного струму; [9] – результати розрахунку миттєвих функцій реактивної потужності за даними моніторингу коливань напруги на струмоприймачі і тягового струму в системах електричного транспорту постійного струму; [10] – запропонований метод визначення непродуктивних втрат від періодичних низькочастотних коливань у випадкових процесах напруги і струму ЕРС постійного струму. Роботи [3, 4, 5, 6, 7, 11] написано автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися й одержали схвалення на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: V-й, «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств», Маріуполь, 2005; LXVI-й, «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2006; LXVII-й, «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2007; I-й, «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (EMC-R 2007), Дніпропетровськ, 2007; VI-й, «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств», Маріуполь, 2008.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 11 наукових працях, у тому числі: 10 – у фахових виданнях; 1 – у матеріалах міжнародної науково-технічної конференції.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаної літератури і трьох додатків. Основний текст роботи викладено на 155 сторінках. Дисертація містить 68 малюнків і 12 таблиць; малюнки і таблиці, розташовані на окремих сторінках, займають 16

сторінок. Список літератури з 100 найменувань приведений на 11 сторінках, додатки – на 6 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 190 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, приведені основні наукові положення і результати, що винесені на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

У *першому розділі* проаналізовано існуючі методи оцінки енергетичних показників електрорухомого складу. У хронологічному порядку критично розглянуто основні публікації по розв'язуваній задачі і встановлено, що в більшості робіт енергетичні показники ЕРС розраховують тільки для усталених незмінних режимів роботи, в яких силові кола ЕРС працюють дуже нетривалий час. Це не враховує весь діапазон зміни навантажень та регулювання в широких межах потужності, а також різкомінливий спотворюючий характер електроспоживання ЕРС при експлуатації. При розрахунку експлуатаційних енергетичних показників відсутній імовірнісний підхід до оцінки низькочастотних періодичних коливань у випадкових процесах напруги на струмоприймачі і тягового струму ЕРС, а також неактивної складової повної потужності та коефіцієнта потужності ЕРС постійного струму. Також робиться висновок, що існуючі методи оцінки ефективності електроспоживання ЕРС постійного струму базуються тільки на критеріях мінімуму споживання електроенергії, а питання її втрат взагалі не розглядається.

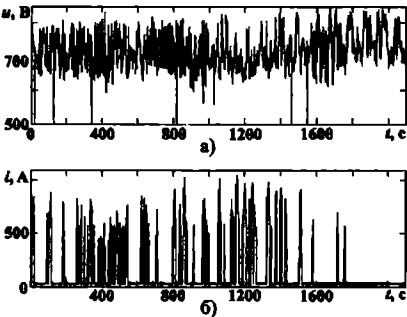


Рис. 1 – Реалізації зміни напруги на струмоприймачі (а) та тягового струму (на два вагони) (б) трамвая типу Т-3

У *другому розділі* теоретично і чисельно досліджено імовірнісно-статистичні характеристики та спектральний склад напруги на струмоприймачі $u(t)$ і тягового струму $i(t)$ різних видів ЕРС, безупинні випадкові технологічні коливання яких (рис. 1) у реальних умовах експлуатації істотно впливають на підвищення втрат електроенергії в силових тягових колах ЕРС.

Дослідження випадкових функцій $u(t)$ і $i(t)$ здійснювали за їх реалізаціями, отриманими у процесі статистичного моніторингу їх технологічних коливань, які вимірювали під час експлуатації електровозів і трамваїв через інтервал $\Delta t = 1$ с, обраний відповідно до теореми Котельникова. Для електровозів ДЕ1 було досліджено 40 реалізацій; для ВЛ8 – 15; для ЧС7 – 10; для реостатного (типу Т-3) і тиристорного (типу Т-3Д) трамваїв – по 6. В результаті обробки цих реалізацій встановлено, що як напруга $u(t)$, так і тяговий струм $i(t)$ є стаціонарними неергодичними процесами. При цьому у електровозів при номінальній нарузі на струмоприймачі в тяговому режимі 3000 В фактичні значення напру-

ги змінюються в діапазоні 2230...3990 В, а у трамваїв в межах 500...980 В при $U_{\text{ном}} = 550$ В. Одномірний у перерізі реалізацій розподіл випадкової величини напруги на струмоприймачі різних видів ЕРС постійного струму з імовірністю $p = 0,17$ за Пірсоном підкоряється закону Гауса з параметрами: $m_u = 3280$ В і $\sigma_u = 215$ В – для електровозів; $m_u = 715$ В і $\sigma_u = 50$ В – трамваїв.

Значення тягового струму при роботі ЕРС змінюються в діапазоні від величини струму холостого ходу до значень: ~ 2500 А для електровозів; ~ 1050 А (на два вагони) для трамваїв. Математичні очікування і середньоквадратичні відхилення тягового струму відповідно складають: $m_i = 780$ А і $\sigma_i = 465$ А для електровозів; $m_i = 410$ А і $\sigma_i = 310$ А для трамваїв. Розподіл випадкової величини струму ЕРС відрізняється від нормального закону і має два характерних максимуми, що сконцентровані в області малих і трохи більше середніх навантажень.

Для спектрального аналізу $u(t)$ та $i(t)$ в дисертації запропоновано два метода: спектрально-статистичний і спектрально-кореляційний. Чисельну оцінку спектрального складу конкретних реалізацій $u(t)$ і $i(t)$, заданих на інтервалі часу $[0, T]$, виконували першим методом за виразом

$$\underline{c}^{(k)} = \frac{-1}{j2\pi k} \sum_{n=1}^N e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} \left\{ (f_{n+1} - f_n) \left[(n+1)e^{-j\frac{2\pi k}{N}} - n + \left(e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} - 1 \right) \left(\frac{N}{j2\pi k} - n \right) \right] + f_n \left(e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} - 1 \right) \right\}, \quad (1)$$

отриманим в дисертації на основі дискретного перетворення Фур'є при кусочно-лінійній апроксимації реалізації (рис. 2), де $\underline{c}^{(k)}$ – комплексна амплітуда « k »-гої гармоніки напруги (струму); $f_n = f(t_n)$ – поточне значення напруги (струму) у момент часу $t_n = n \Delta t$; $\Delta t = 1$ с – крок дискретизації; $n = 0, 1, \dots, N$; $N = T / \Delta t$ – загальна кількість інтервалів дискретизації.

Застосування формули (1) до реалізації дозволяє одержувати її амплітудно-частотну (рис. 3) і фазово-частотну характеристики, але ця реалізація є лише частковим випадком досліджуваного випадкового процесу

Рис. 2 – Дискретизація реалізації випадкової функції $f(t)$

напруги (струму). Оскільки графіки різкозмінних навантажень ЕРС містять значну випадкову складову, то гармонічний склад процесів $u(t)$ і $i(t)$ буде мати імовірнісний характер, що ускладнює одержання з реалізацій стійких даних по амплітудам і частотам дискретного спектру гармонік.

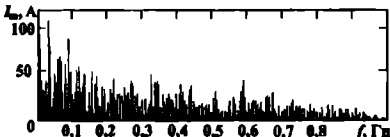


Рис. 3 – Спектр тягового струму електровозу ДЕ1, визначений за реалізацією $i(t)$

Для встановлення гармонік в $u(t)$ і $i(t)$, які мають властивість стійко виявлятися у всьому випадковому процесі, в дисертації застосовано другий, спектрально-кореляційний спосіб.

Кореляційні функції напруги та

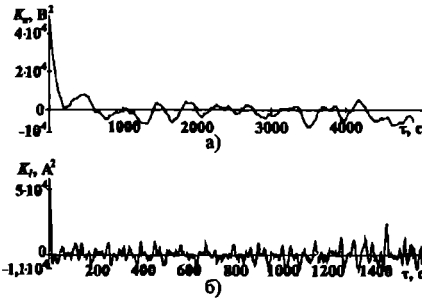


Рис. 4 – Кореляційні функції: напруги на струмоприймачі електровозу ДЕ1 (а); тягового струму трамваю Т-3Д (б)

випадкових процесів $u(t)$ або $i(t)$, а до «хвоста» їх кореляційних функцій $K(\tau)$, що дозволило відфільтрувати періодичні коливання від власне випадкового процесу. При цьому встановлено, що спектр кореляційних функцій напруги і струму проріджений в порівнянні зі спектром миттєвих графіків $u(t)$ і $i(t)$. Тобто, він вільний від випадкових коливань та вміщує в собі лише низькочастотні періодичні складові коливання, які в промисловій електроенергетиці називають інтегармоніками, що виникають в електричних системах з різкозмінним нестационарним навантаженням, яким, доречі, і є тягове навантаження.

В результаті розрахунків також встановлено, що спектри як миттєвих графіків процесів $u(t)$ та $i(t)$ ЕРС постійного струму, так і їх кореляційних функцій в усталених режимах знаходяться в діапазоні частот 0,001...1,5 Гц. У перехідних експлуатаційних режимах роботи – при вмиканні і вимиканні ЕРС тягового навантаження, а також при регулюванні потужності – частоти і рівні гармонік значно перевищують рівні, визначені за тривалістю всієї реалізації, і знаходяться у діапазоні 0,1...10 Гц (рис. 5).

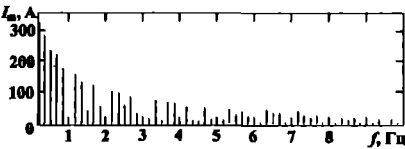


Рис. 5 – Спектр тягового струму електровозу ДЕ1 у перехідному режимі

Енергія інтегармонік випадкових процесів $u(t)$ та $i(t)$ для ЕРС складає ~ 15 % від енергії усього випадкового процесу у електровозів та ~ 25 % – у трамваїв, тобто значна, що необхідно враховувати при аналізі електроенергетичних процесів у системі тяги постійного струму.

У *третьому розділі* викладено теоретичні передумови та адаптовано до систем ЕРС постійного струму методи визначення складових повної потужності та коефіцієнта потужності, а також виконано їх чисельні розрахунки і прогнозування для електровозів ВЛ8 і ДЕ1 та трамваїв Т-3 і Т-3Д.

Для виконання зазначених розрахунків одиницю ЕРС розглядали у вигляді пасивного параметричного двополосника (рис. 6), входними діями якого є випадкові функції напруги на струмоприймачі $u(t)$ та тягового струму $i(t)$ ЕРС. Визначення повної S , активної P і неактивної Q потужностей двополосника, а також основних енергетичних показників здійснювали на підставі отриманих

тягового струму ЕРС мають незагасаючий зі збільшенням τ коливальний характер (рис. 4), що свідчить про неергодичність випадкових процесів $u(t)$ і $i(t)$, і що обумовлено, найчастіше, наявністю в них схованої періодичності. Незагасаюча частина (так званий «хвіст») кореляційних функцій містить частоти періодичних складових, що і самі випадкові процеси. Тому для виявлення частот і рівнів періодичних коливань в напрузі і струмі було застосовано перетворення Фур'є не до самих

при експлуатації ЕРС реалізацій вхідних дій (типу рис. 1).

Коефіцієнт потужності λ ЕРС, згідно ДСТУ 2843-94 і ДСТУ 3121-95, визначали як відношення активної потужності P , що споживається в конкретному режимі роботи одиниці ЕРС, до підведеної повної потужності S

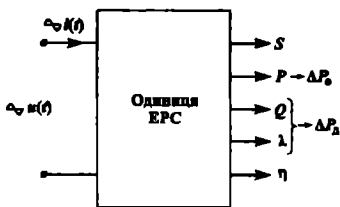


Рис. 6 – Структурна схема розрахунків

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}. \quad (2)$$

Величина λ для ЕРС постійного струму фізично характеризує вплив режиму електроспоживання ЕРС на ефективність транспортування електроенергії, тобто побічно визначає втрати потужності ΔP в силових колах ЕРС. Якщо електроспоживання ЕРС відбувається при $\lambda < 1$, то електричні втрати

ΔP в системі перевищують бажані мінімальні, які існують для передачі відповідної активної потужності P . Ці втрати в ЕРС від неякісного електроспоживання в цій роботі визначали через їх еквівалент – неактивну Q складову повної потужності, яка складається в загальному випадку з потужності обміну (накопичення) і потужності спотворення, які поряд з активною потужністю впливають на втрати ΔP в ЕРС.

Найбільш універсальною концепцією для розрахунку неактивної потужності, у тому числі в системах з ЕРС постійного струму, є концепція С. Фризе, що визначає інтегральну неактивну потужність (або реактивну потужність Фризе) у вигляді: $Q_\Phi = \sqrt{S^2 - P^2}$. Крім того, на підставі цієї концепції, миттєвий споживаний струм $i(t)$ (рис. 6) на довільному інтервалі часу $[0, T]$ можна представити у вигляді суми двох ортогональних складових – активного струму $i_a(t)$, що співпадає за фазою і формою з прикладеною (на струмоприймачі) напругою $u(t)$ і який виконує корисну роботу, та неактивного (традиційно іменованого «реактивним») струму $i_p(t)$: $i(t) = i_a(t) + i_p(t)$. Складові $i_p(t)$ у тяговому струмі ЕРС має місце у випадку, якщо форма $i(t)$ відрізняється від форми прикладеної напруги $u(t)$, тобто $i_p(t)$ є мірою спотворення тягового струму $i(t)$. В такому разі вирази миттєвих активного і неактивного струмів ЕРС мають вигляд:

$$i_a(t) = \frac{P}{U^2} u(t); \quad i_p(t) = i(t) - \frac{P}{U^2} u(t). \quad (3)$$

де P , U – активна потужність та діюче значення напруги на струмоприймачі ЕРС за розглядуваний час $[0, T]$. Це дозволяє виконувати розрахунки продуктивних та непродуктивних втрат електроенергії.

Визначення потужностей P , S , Q_Φ силових кіл ЕРС зі стохастичними $u(t)$ і $i(t)$ здійснювали за двома методами: користуючись власне миттєвими значеннями реалізацій випадкових функцій $u(t)$ і $i(t)$ після їхньої дискретизації за часом та спектрально-статистичним методом на основі дискретного перетворення Фур'є. Перший метод полягає в заміні для кожної реалізації $u(t)$ і $i(t)$ визначених інтегралів для знаходження активної потужності P і діючих значень на-

пруги U та струму I кінцевими сумами:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n i_n, \quad (4)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2}; \quad I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2}, \quad (5)$$

де P_n , u_n , i_n – дискретні значення в реалізаціях відповідно миттєвої потужності $p(t)$, напруги на струмоприймачі $u(t)$ та тягового струму $i(t)$ ЕРС. При цьому коефіцієнт потужності ЕРС визначали за виразом (2). В силу випадковості процесів $u(t)$ і $i(t)$ величини P , S , λ , а також реактивна потужність Фризе Q_ϕ будуть також випадковими.

Другий метод визначення потужностей P , S і Q_ϕ базується на спектральному представленні (способом дискретизації) реалізацій стохастичних процесів $u(t)$ і $i(t)$ та полягає у знаходженні потужностей за класичними виразами:

$$P = \sum_{k=0}^s P^{(k)} = \sum_{k=0}^s U^{(k)} I^{(k)} \cos \varphi^{(k)}; \quad S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^s U^{(k)2}} \sqrt{\sum_{k=0}^s I^{(k)2}} \quad (6)$$

де $U^{(k)}$, $I^{(k)}$ – діючі значення « k »-тих гармонік рядів Фур'є напруги $u(t)$ і струму $i(t)$; s – кількість гармонік у їх спектральному складі.

Найбільш загальними ознаками споживання неактивної потужності силовими тяговими електричними колами ЕРС є такі: нерівність активної P і повної S потужностей кола (значення коефіцієнта потужності менше одиниці); зміна в часі значення миттєвого повного опору $z(t) = u(t)/i(t)$ одиниці ЕРС; наявність режиму повернення електроенергії із ЕРС у систему тягового електропостачання (ознака і наслідок).

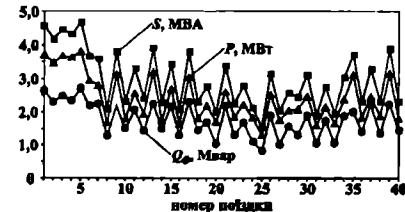


Рис. 7 – Результати розрахунку активної P , повної S та неактивної Q_ϕ потужностей електровозу ДЕ1 у 40 поїздках

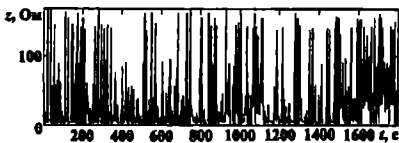


Рис. 8 – Графік зміни миттєвого опору силового кола тиристорного трамваю Т-3Д

Перша ознака споживання для ЕРС постійного струму виконується: у результаті розрахунків встановлено, що $P < S$ (рис. 7), тобто $\lambda < 1$. Друга ознака також задовольняється, оскільки миттєвий опір силового кола ЕРС у тяговому режимі $z(t) \neq \text{const}$ (рис. 8), та має явно виражений різкозмінний характер. Наявність обмінного енергетичного процесу також можлива, про що свідчать значення та знак миттєвої реактивної потужності $q(t)$. Такий обмінний процес, імовірно, відбувається між нелінійними індуктивностями тягових двигунів ЕРС та конденсаторами фільтрів згладжуючого пристрою тягової підстанції.

В результаті розрахунків встановлено, що значення коефіцієнта потужності ЕРС постійного струму в тяговому

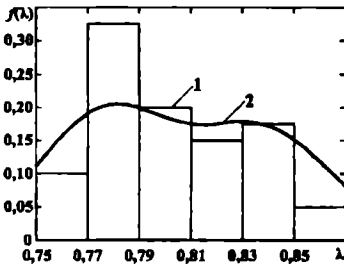


Рис. 9 – Експериментальне (1) та теоретичне (2) розподілення випадкової величини коефіцієнта потужності електровоза ДЕ1

режимі у реальних умовах експлуатації складає: 0,75...0,87 для електровозів ДЭ1 при $\bar{\lambda} = 0,81$; 0,63...0,71 – електровозів ВЛ8 при $\bar{\lambda} = 0,68$; 0,62...0,78 – трамваїв при $\bar{\lambda} = 0,64$. Статистичні розподіли (гістограми) потужностей і коефіцієнта потужності (рис. 9) підкорюється асиметричному нормальному закону з дисперсійною функцією. Коефіцієнт потужності ЕРС, як показано вище, є випадковою величиною, бо залежить від багатьох факторів, основні з яких: профіль ділянки колії, маса поїзда (склалала від 1188 до 5165 тонн) і режим його ведення. Останній фактор залежить від

кваліфікації машиніста і не є другорядним. Коливання напруги на струмоприймачі в розглянутих діапазонах знижують значення λ лише на 4...5 %, тому основним чинником, що впливає на низькі значення коефіцієнта потужності ЕРС, є явно виражений різкозмінний характер тягового струму, обумовлений регулюванням потужності ЕРС в процесі керування поїздом.

В роботі також досліджено миттєвий коефіцієнт потужності ЕРС, визначений у вигляді функції $\lambda(t) = P(t)/S(t)$. Встановлено, що в процесі електроспоживання ЕРС значення $\lambda(t)$ піддаються значним коливанням; наприклад для реостатного трамвая типу Т-3 за одну поїздку λ змінювався в межах 0,5...0,98, при середньому за поїздку 0,76, тобто $\lambda(t)$ також є випадковою функцією. Із аналізу $\lambda(t)$ ЕРС чітко видно, що λ значно знижується в ті моменти часу, коли відбувається різка зміна споживаного струму (вмикання або вимикання тяги). Тобто, в процесі електроспоживання ЕРС це обумовлено спотворюваннями форми його тягового струму відносно форми напруги прикладеної до струмоприймача.

Запропоновано прогнозувати значення коефіцієнта λ теоретично, на основі реалізацій $i(t)$, отриманих за тяговими розрахунками. Наприклад, для електровозів ДЕ1 на реальних ділянках Придніпровської залізниці за тяговим розрахунком значення коефіцієнта потужності склало близько 0,69.

У *четвертому розділі* подано теоретичні передумови і виконано чисельні розрахунки непродуктивних втрат електроенергії у силових тягових колах ЕРС та його коефіцієнта корисної дії η (к.к.д.).

В основу розрахунку величини η було покладено інтегральний вираз середнього к.к.д. за період поїздки (за термін часу реалізації):

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\int_0^t F(t)v(t)dt}{\int_0^t u(t)i(t)dt}, \quad (7)$$

де $F(t)$, $v(t)$, $u(t)$, $i(t)$ – миттєві відповідно сила тяги тягових двигунів (ТЕД) ЕРС, швидкість руху, напруга на струмоприймачі, споживаний з мережі струм за поїздку. Реалізації останніх трьох величин реєстрували у процесі статистичного моніторингу, а часову реалізацію сили тяги $F(t)$ ЕРС (рис. 10), у зв'язку зі

складністю виміру, визначали за допомогою тягових характеристик ЕРС $F(v)$

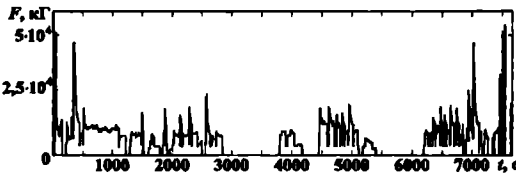


Рис. 10 – Часова реалізація сили тяги електровоза ВЛ8 в одній із поїздок

на підставі виразу $F = f[v(t), \vartheta(t), u(t)] = f(t)$, (8) де сила тяги локомотива F , згідно функцій $F(v)$, явно залежить від швидкості $v(t)$, відомого алгоритму керування ЕРС $\vartheta(t)$ (схеми з'єднання ТЕД у силовому колі та послаблення збудження ТЕД) та неявно залежить від напруги на струмоприймачі $u(t)$, що впливає на зміщення конкретної характеристики $F(v)$. Для цього тягові характеристики $F(v)$ ЕРС було апроксимовано та екстрапольовано в область більших швидкостей. В результаті розрахунку η_{cp} за формулою (7) (після заміни інтегралів кінцевими сумами) встановлено, що на досліджуваних ділянках Придніпровської залізниці середній к.к.д. роботи електровозів ВЛ8 $\eta_{cp} = 0,737$, тобто нижче його номінального значення для тривалого усталеного режиму, яке складає за паспортом 0,891. Низькі значення η_{cp} електровозу обумовлені реальними стохастичними умовами експлуатації, неоптимальними режимами ведення поїзда та ін.

За реалізаціями $F(t)$, $v(t)$, $u(t)$, $i(t)$ також було визначено реалізацію зміни миттєвої величини к.к.д. за час поїздки (рис. 11) у вигляді функції

$$\eta(t) = \frac{F(t)v(t)}{u(t)i(t)}, \quad (9)$$

під якою розуміється відношення миттєвої, реалізованої на ободі коліс ЕРС, механічної потужності по переміщенню поїзда $[F(t)v(t)]$ (корисної потужності) до миттєвої електричної потужності $[u(t)i(t)]$, споживаної з тягової мережі. Миттєві значення η в реалізації являють собою також випадкові величини, розподілені за асиметричним нормальним законом (рис. 12) і знаходяться в діапазоні $\sim 0,21 \dots 0,88$ при математичному сподіванні $M[\eta(t)] = 0,731$ і середньоквадратичному відхиленні $\sigma_{\eta} = 0,1$. На резуль-

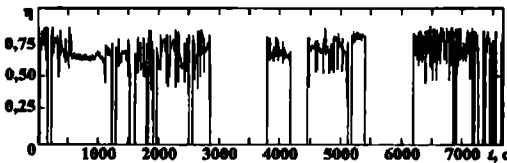


Рис. 11 – Графік зміни миттєвого к.к.д. електровозу ВЛ8 під час поїздки

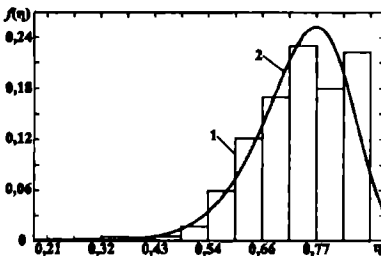


Рис. 12 – Гістограма (1) та теоретичний розподіл (2) випадкової величини к.к.д. електровозу ВЛ8 за час поїздки

туюче значення к.к.д. $\eta(t)$ ЕРС (рис. 11) у будь-який момент часу впливає сукупність усіх можливих джерел втрат електроенергії в енергетичному колі ЕРС: основні і додаткові втрати в ТЕД, реостатні пуски, випадкові фактори буксування при розгоні та проковзування при русі колісних

в енергетичному колі ЕРС: основні і додаткові втрати в ТЕД, реостатні пуски, випадкові фактори буксування при розгоні та проковзування при русі колісних

пар, нестационарний режим електроспоживання та ін.

Споживання ЕРС активної потужності P невід'ємно пов'язано з електричними втратами ΔP_0 (рис. 6) в активних опорах його силового кола. Ці втрати є мінімально можливими, неминучими та необхідні для споживання (передачі) відповідної активної потужності P на виконання корисної роботи ЕРС, тому їх називають основними ΔP_0 або продуктивними. Втрати ж, що викликані неякісним електроспоживанням (коли $\lambda < 1$ та $Q \neq 0$ і т.ін.), називають додатковими ΔP_d або непродуктивними (рис. 6). Тоді загальні електричні втрати ΔP в колі ЕРС при електроспоживанні є сумою складових ΔP_0 та ΔP_d , тобто $\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_d$. У свою чергу, втрати ΔP_d обумовлені двома наступними факторами. Нестационарний характер електроспоживання ЕРС є першою причиною складової непродуктивних втрат потужності ΔP_p , що пов'язані зі спотворенням форми тягового струму $i(t)$ по відношенню до форми прикладеної до струмоприймача напруги $u(t)$. Друга причина – періодичні низькочастотні технологічні коливання тягового струму $i(t)$ (інтергармоніки), що виникають в наслідок квазіперіодичного електроспоживання та регулювання в широкому діапазоні потужності ЕРС; ці коливання обумовлюють складову непродуктивних втрат ΔP_{\sim} . У результаті непродуктивні електричні втрати в силовому колі ЕРС можна записати як суму складових

$$\Delta P_d = \Delta P_p + \Delta P_{\sim}, \quad (10)$$

що визначаються відповідно до виразів:

$$\Delta P_p = \frac{1}{T} \int_0^T i_p^2(t) R dt = I_p^2 R = \frac{Q_\phi^2}{U^2} R; \quad \Delta P_{\sim} = \sum_{k=1}^n R I^{(k)2}, \quad (11)$$

де I_p – діюче значення неактивної складової тягового струму; Q_ϕ – неактивна потужність (реактивна потужність по Фризе); U – діюче значення напруги на струмоприймачі за час T електроспоживання; $I^{(k)}$ – діюче значення k -тої гармоніки ряду Фур'є тягового струму ЕРС; R – активний опір силового кола ЕРС.

Користуючись приведеними вище виразами, були чисельно розраховані повні електричні ΔP та непродуктивні (додаткові) ΔP_d втрати потужності в активних опорах обмоток ТЕД ряду одиниць ЕРС (табл.). Зокрема цими розрахунками встановлено, що повні втрати ΔP в ТЕД електровозу ВЛ8 складають у середньому 6,12...7,21 % від спожитої двигуном потужності P за поїздки (табл., стовпець 2), а непродуктивні втрати ΔP_d складають 26,86...34,28 % від загальних втрат ΔP (табл., стовпці 3 і 6). При цьому неактивна складова тягового струму I_p збільшує загальні електричні втрати ΔP в ТЕД електровозу на 12,2...14 % (стовпці 4 і 7 в табл.), а низькочастотні періодичні коливання (інтергармоніки) тягового струму – у середньому на 10...22 % (стовпці 5 і 8). Також встановлено, що в активних опорах ТЕД трамваїв загальні втрати ΔP складають 6,7...8,1 % від витраченої двигуном на тягу потужності P . У цих втратах ~ 16 % займають електричні втрати від неактивного струму і ~ 27 % – втрати від технологічних коливань струму.

Таким чином, непродуктивні втрати потужності в силових колах трамваїв досягають ~ 43 % від загальних втрат ΔP , тобто збільшують основні (мінімальні) втрати ΔP_0 майже вдвічі. Оскільки тяговий струм, який обумовлює втрати потужності, є випадковою величиною, то можна довести, що й зроблено в дисертації, що втрати ΔP_d , а отже і ΔP , визначаються дисперсією струму. Тобто, чим більша дисперсія випадкової величини струму, тим більші непродуктивні втрати потужності.

Таблиця

Результати розрахунку повних ΔP і непродуктивних ΔP_d електричних втрат потужності в активних опорах обмоток тягового двигуна НБ-406

№ поїздки	З вибігами							Без вибігів		
	$\frac{\Delta P}{P} 100\%$	$\frac{\Delta P_d}{\Delta P} 100\%$	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P} 100\%$	$\frac{\Delta P_{\sim}}{\Delta P} 100\%$	$\frac{\Delta P_d}{\Delta P} 100\%$	$\frac{\Delta P_p}{\Delta P} 100\%$	$\frac{\Delta P_{\sim}}{\Delta P} 100\%$			
	%	%	%	%	%	%	%			
1	2	3	4	5	6	7	8			
1	7,21	33,93	12,32	21,61	24,77	12,32	12,45			
2	6,92	32,61	13,47	19,14	27,09	13,47	13,62			
3	6,12	34,28	14,03	20,25	26,86	14,03	12,83			
4	6,41	32,84	12,24	20,60	23,56	12,24	11,32			
5	6,76	31,31	12,21	19,10	22,42	12,21	10,21			

Втрати $\Delta P_p = 0$ у випадку збігу форми (або спектру) $i(t)$ з $u(t)$ на протязі всього часу T електроспоживання, що у реальній експлуатації ЕРС неможливо; втрати $\Delta P_{\sim} = 0$ можливі якщо $i(t) = \text{const}$ за час T , що для електротяги також нездійсненно. Отже, загальні електричні втрати в силовому колі $\Delta P \rightarrow \Delta P_0 = \Delta P_{\min}$ можливі якщо складові $\Delta P_p \rightarrow \min$ і $\Delta P_{\sim} \rightarrow \min$, для чого необхідно створення додаткових умов електроспоживання ЕРС, тобто потрібно застосування певних заходів. Тому в цьому розділі також розглянуто та обґрунтовано додаткові (окрім λ та η) критерії ефективності електроспоживання ЕРС, до яких варто віднести такі критерії: мінімуму втрат електроенергії; мінімізації миттєвих значень струму; рівномірного споживання енергії; усунення зворотних потоків енергії. Вхідними незмінними базовими величинами для даних критеріїв є напруга на струмоприймачі і установлена потужність S ЕРС (чи споживана активна потужність P).

У *п'ятому розділі* запропоновано та проаналізовано ряд способів підвищення енергетичних показників ЕРС, а саме: компенсація неактивної потужності та низькочастотних періодичних коливань (інтергармонік) тягового струму; вирівнювання та стабілізація електроспоживання ЕРС за допомогою застосування пристроїв накопичення і передачі електричної енергії, а також завдяки зменшенню надлишкової потужності одиниць ЕРС у процесі тяги шляхом оперативного вимикання необхідної кількості тягових двигунів; розробка оптимальних за критерієм втрат потужності та коефіцієнта потужності режимних карт ведення поїздів. Розглянемо коротко ці заходи.

Задача компенсації неактивної потужності вирішується зниженням неактивної складової тягового струму ЕРС, що виникає при частих перехідних експлуатаційних режимах роботи. Для цього розглянуто можливість вмикання паралельно силовому колу ЕРС регульованого ємнісного компенсатора. В дисертації теоретично встановлено, що його ємність повинна змінюватися в залежності від миттєвих значень $u(t)$ і $i(t)$, а також їх похідних. Дана компенсація відноситься до динамічного класу і для її здійснення необхідне відстеження миттєвих величин напруги на струмоприймачі $u(t)$ і тягового струму $i(t)$, а також швидкодіюча система автоматичного керування, яка у режимі реального часу здатна налаштовувати параметри компенсатора.

Для зниження втрат електроенергії від технологічних коливань тягового струму необхідно цілком виключити з його спектру гармоніки, що стійко виявляються у випадковому процесі $i(t)$ і на яких зосереджена значна енергія коливань струму. Тоді компенсацію цих гармонік можна здійснити за допомогою використання режекторних або демпферних резонансних LC - фільтрів, налаштованих на режим резонансу струмів за частотою цих коливань.

Для покращення форми тягового струму ЕРС заслуговує на увагу питання встановлення на рухомому складі накопичувача електроенергії великої енергоємності, який при холостому ході ЕРС (вибігу) буде працювати в режимі підзарядки, споживаючи енергію з мережі певною величиною тягового струму, й тим самим стабілізувати тягове навантаження (роблячи його більш рівномірним). При переході ЕРС у тягу накопичувач повинен розряджатися, підживлюючи силові кола ЕРС. У такому випадку в тяговому режимі рухомих складом з мережі будуть споживатися вже менші тягові струми, оскільки частина енергії, складеної накопичувачем на вибігах, буде цілком повертатися в силове коло ЕРС. Тобто, у тяговому режимі на ЕРС буде діяти два потоки енергії – з тягової мережі і накопичувача електроенергії. В якості акумуляторів можливо застосування на ЕРС ємнісного накопичувача зі ступеневим регулюванням ємності.

Найбільш можливим заходом зниження непродуктивних втрат електроенергії в ЕРС є зниження його надлишкової потужності шляхом оперативного вмикання певної кількості тягових двигунів у процесі руху. Вимикання тягових двигунів, наприклад для електровоза ВЛ8 при напрузі на ТЕД 1500 В, дозволяє приблизно на 40 % заповнити нерегульовану область потужності електровоза в полі тягових характеристик $F(v)$ між характеристикою СП (збудження 36 %) і П (збудження 100 %). Завдяки одержанню при цьому додаткових ходових (природних) проміжних тягових характеристик стає можливим підібрати силу тяги ЕРС із меншим відхиленням від опору руху поїзда, що, істотно, розширює регульовальні властивості ЕРС. Вимикання необхідної кількості ТЕД на П з'єднанні дозволяє здійснювати роботу тягових двигунів ЕРС у зоні високих к.к.д., а також створити раціональне завантаження ТЕД при неповновагових поїздах і на ділянках з легким профілем колії, що особливо ефективно для підтримки швидкості руху поїзда. У свою чергу, це призведе до зменшення величини і спотворення форми тягового струму, а отже і втрат електроенергії, оскільки для підтримки постійної швидкості руху поїзда машиністу вже не треба ре-

гулярно переходити з одного з'єднання ТЕД на інше або на вибіг. Тягові розрахунки, виконані для ділянок Придніпровської залізниці, показали, що застосування викладеного принципу дозволяє підвищити коефіцієнт потужності ЕРС на 7...9 %, а к.к.д. на 2 %.

Ще одним методом зниження втрат електроенергії в силових тягових колах ЕРС є розробка раціональних режимів ведення поїздів на основі тягових розрахунків. Оптимальність цих режимів повинна обиратися не лише за критерієм мінімуму витрат електроенергії на тягу при встановленому часі ходу поїзда, але також і за критеріями мінімуму непродуктивних втрат електроенергії і максимуму коефіцієнта потужності ЕРС.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень реальних електроенергетичних процесів, що протікають у силових тягових колах електрорухомого складу електричної тяги постійного струму, вирішена актуальна науково-технічна задача підвищення ефективності використання і якості електричної енергії на електрифікованих ділянках магістрального залізничного і міського електротранспорту. Отримані результати в сукупності мають суттєве значення в області електричного транспорту і його електропостачання. Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. З загального обсягу споживаної електрифікованим залізничним транспортом електроенергії основна її частина, 80...84 %, використовується безпосередньо на електротягу поїздів, що вимагає, заради розв'язання задач енергозбереження, розробки і впровадження нових електросберігаючих технологій, які базуються на аналізі реальних електроенергетичних процесів, що протікають у системі тяги. У той же час існуючі методи і критерії оцінки енергетичних показників електрорухомого складу постійного струму ґрунтуються, поперше, на визначенні їх лише для усталеного режиму, по-друге, при цьому не враховуються стохастичні зміни напруги на струмоприймачі і тягового струму ЕРС, по-третє, не розглядаються питання непродуктивних втрат електроенергії і, нарешті, вважається, що ЕРС постійного струму не споживає неактивної потужності.
2. Напруга на струмоприймачі $u(t)$ і тяговий струм $i(t)$ ЕРС постійного струму є стаціонарними неергодичними випадковими процесами з одномірним у перетині їхніх реалізацій розподілом за законом Гауса з функцією математичного сподівання для напруги $m_u(t) \approx 3275$ В і дисперсією $D_u(t) \approx 46015$ В². Випадкові коливання напруги знаходяться в межах 2230...3990 В при номінальному 3000 В для електровозів і 500...980 В при номінальному 550 В – для трамваїв. Тяговий струм змінюється в діапазоні від нуля до 2500 А у електровозів і до 1050 А (на 2 вагони) у трамваїв; при цьому фактичні значення споживаних струмів зміщені в область їхніх малих значень, тобто, має місце недовикористання одиниць ЕРС за потужністю.
3. Спектральний аналіз випадкових процесів напруги на струмоприймачі $u(t)$ і

тягового струму $i(t)$ неможливий класичним методом Фур'є; для цієї мети необхідне використання запропонованих у даній дисертації методів, що базуються на прямому дискретному перетворенні Фур'є власне реалізацій $u(t)$ і $i(t)$ або їх кореляційних функцій.

4. Амплітудні спектри процесів напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ мають імовірнісний характер з розподілом за логарифмічно-нормальним законом, містять низько-частотні періодичні складові (інтергармоніки) у діапазоні частот 0,001...1,5 Гц при визначенні їх по повній тривалості реалізацій $u(t)$, $i(t)$ і в діапазоні 0,1...10 Гц – при визначенні на ділянках, що відповідають тільки перехідним режимам роботи ЕРС. При цьому тяговий струм трамваїв містить інтергармоніки більш високих частот (чим електровозів) унаслідок більшої нестационарності зміни $i(t)$. Енергія інтергармонік змінних $u(t)$ і $i(t)$ складає до 15 % всієї енергії зазначених випадкових процесів для електровозів і до 25 % – для трамваїв.
5. Електрорухомиий склад постійного струму є потужним споживачем неактивної потужності, величина якої на досліджуваних ділянках Придніпровської залізниці у відсотках від повної потужності для електровозів ДЕ1 склала до 50 %. Ця потужність обумовлена двома складовими: потужністю накопичення в індуктивних елементах силового кола ЕРС і потужністю спотворення, викликаного спотвореннями напруги на струмоприймачі і тягового струму.
6. Визначення енергетичних показників ЕРС – коефіцієнта потужності, втраченої потужності, к.к.д. – й тим самим оцінку ефективності електроспоживання ЕРС з урахуванням випадкового характеру зміни напруги на струмоприймачі $u(t)$ і тягового струму $i(t)$ необхідно здійснювати адаптованим у дисертації методом дискретного перетворення Фур'є процесів $u(t)$ і $i(t)$.
7. З метою найбільш точної оцінки енергетичних процесів, що протікають у тягових колах ЕРС, варто розрізняти і тим самим визначати інтегральну λ (середню за поїздку) і миттєву $\lambda(t)$ (у будь-який момент часу електроспоживання) величини коефіцієнта потужності ЕРС. Фактичні значення обох величин λ електрорухомого складу постійного струму помітно нижче 1 (одиниці). Зокрема, інтегральна величина λ складає: 0,75...0,87 у електровозів ДЕ1; 0,65...0,78 – електровозів ВЛ8; 0,63...0,76 – трамваїв. Миттєві значення $\lambda(t)$ у трамваїв змінюються в діапазоні 0,5...0,98.
8. Різкозмінний характер напруги на струмоприймачі і тягового струму збільшує на (17...19) % середнє значення, при середньоквадратичному відхиленні (58...62) %, динамічної похибки лічильника електроенергії електродинамічної системи типу Дб21, застосовуваного на електровозах постійного струму ЧС7, унаслідок чого його фактичні показання малодостовірні.
9. Стохастичний характер тягового навантаження, внаслідок безупинного регулювання в широкому діапазоні потужності ЕРС, викликає зниження його к.к.д. до значень $\sim 0,737$, що істотно нижче паспортних величин, приведених для усталеного режиму роботи.
10. У процесі експлуатації (руху) при зміні режиму роботи змінюється також і к.к.д. ЕРС, тому для більш точної оцінки енергоефективності електроспоживання ЕРС необхідно розглядати к.к.д. як миттєву функцію. Миттєві значення

к.к.д. ЕРС протягом поїздки змінюються в широкому діапазоні: 0,21...0,88. Низькі значення к.к.д. ЕРС у процесі роботи обумовлені реостатними пусками, буксуванням колісних пар при разгонах ЕРС, їхнім проковзуванням при русі, усіма видами основних і додаткових втрат електроенергії в ТЕД.

11. Загальні електричні втрати енергії ΔW в активних опорах обмоток тягових двигунів електровозів складають у середньому 6,1...7,2 % від витраченої двигунами енергії на тягу, у яких частку 26,86...34,28 % займають непродуктивні втрати. Останні втрати є сумою двох складових: втрат від неактивної складової тягового струму, обумовленої спотворенням форми споживаного струму $i(t)$ відносно форми прикладеної напруги $u(t)$ (складають 12...14 % від ΔW), і втрат від періодичних низькочастотних технологічних коливань (інтергармонік) споживаного струму (складають 10...22 % від ΔW). У тягових двигунах трамваїв загальні електричні втрати ΔW досягають 6,7...8,1 %, а в них близько 43 % складають непродуктивні втрати: 16 % від загальних втрат – електричні втрати від неактивного струму $i \sim 27$ % – втрати від інтергармонік.
12. Підвищення ефективності електроспоживання ЕРС в експлуатації можливо на підставі наступних заходів: розробка оптимальних за критерієм втрат потужності і коефіцієнта потужності режимних карт ведення поїздів; компенсація неактивної складової тягового струму ЕРС; компенсація низькочастотних періодичних коливань (інтергармонік) тягового струму ЕРС; стабілізація змінного тягового навантаження ЕРС на основі застосування автономних накопичувачів електроенергії; зменшення надлишкової потужності ЕРС за допомогою раціонального регулювання його встановленої потужності шляхом оперативного вимикання необхідної кількості ТЕД.
13. Повна компенсація неактивної потужності ЕРС можлива вмиканням паралельно тяговому колу ЕРС конденсатора, закон зміни ємності якого визначається змінами напруги на струмоприймачі і тягового струму ЕРС, а також їх похідними у даний і наступний моменти часу. Для усунення інтергармонік, які стійко виявляються у випадковому процесі тягового струму, необхідне застосування пасивних режекторних LC - фільтрів, налаштованих на відповідні частоти.
14. Найбільш практично можливими раціональними методами підвищення ефективності електроспоживання ЕРС постійного струму є розробка оптимальних за критерієм величини втрат потужності ΔP і коефіцієнта потужності λ режимних карт ведення поїздів і оперативне регулювання встановленої потужності ЕРС шляхом виведення з режиму тяги певної кількості тягових двигунів. Зокрема встановлено, що використання другого методу дозволяє підвищити коефіцієнт потужності електровоза ВЛ8 на 9 %, що, у свою чергу, призводить до зниження втрат електроенергії і підвищенню к.к.д. на 2 %.

Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Костин Н. А. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Электротехника і електромеханіка. – 2005'1. – С. 97-101.
2. Костин Н. А. Реактивная мощность в системах электрического транспорта

415502

- постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2005. – № 15. – С. 75-80.
3. Саблин О. И. Система электрической тяги постоянного тока – система непостоянного тока / О. И. Саблин // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 14. – С. 67-72.
 4. Саблин О. И. Интергармоники тягового тока и напряжения на токоприёмнике электрического транспорта постоянного тока / О. И. Саблин // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 76. – С. 112-120.
 5. Саблин О. И. Спектральный анализ случайных функций тягового тока и напряжения на токоприемнике электроподвижного состава / О. И. Саблин // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 15. – С. 41-47.
 6. Саблин О. И. Дополнительные пульсационные потери мощности в силовых тяговых цепях ЭПС постоянного тока / О. И. Саблин // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 18. – С. 38-41.
 7. Костин Н. А. Неактивная мощность и дополнительные потери электроэнергии в электроподвижном составе постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2007. № 8 (114). – С. 49-53.
 8. Саблин О. И. Мгновенные энергетические показатели электроподвижного состава постоянного тока / О. И. Саблин // Електротехніка і електромеханіка. – 2008'3. – С. 48-50.
 9. Миттєва реактивна потужність у системах електричного транспорту постійного струму / М. О. Костін, О. І. Саблін, О. Г. Шейкіна [та ін.] // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 79. – С. 3-8.
 10. Костин Н. А. Интергармоники тягового тока и напряжения в системах электрического транспорта постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин, А. В. Петров // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: міжнар. наук.-техн. конф., 21-23 травня 2008 р.: збірник праць. – Маріуполь, 2008. С. 51-55.
 11. Саблин О. И. Непроизводительные потери электроэнергии в системах электрического транспорта постоянного тока / О. И. Саблин // Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи: міждунар. наук.-практ. конф., 29-30 травня 2008 р.: тези доп. – Д., 2008. – С. 76-77.

АНОТАЦІЯ

Саблін О.І. Підвищення ефективності електроспоживання електрорухомого складу постійного струму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2009.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності електроспоживання електрорухомого складу системи тяги постійного струму за рахунок зниження непродуктивних втрат електроенергії, визначених на основі досліджень балансу реальних електроенергетичних процесів, що протікають у силових тягових колах.

Досліджено імовірнісно-статистичні характеристики та спектральний склад напруги на струмоприймачі і тягового струму різних видів ЕРС постійного струму. Встановлено, що у випадкових процесах зміни напруги і тягового струму ЕРС містяться низькочастотні періодичні коливання (інтергармоніки).

Викладено теоретичні передумови та адаптовано до систем ЕРС постійного струму методи визначення складових повної потужності та коефіцієнта потужності, а також виконано їх чисельні розрахунки і прогнозування для електровозів та трамваїв. Встановлено, що коефіцієнт потужності ЕРС постійного струму менше одиниці.

Виконано чисельні розрахунки непродуктивних втрат електроенергії у силовому колі ЕРС та його коефіцієнта корисної дії (к.к.д.). Встановлено, що на значення к.к.д. впливає спотворення та низькочастотні періодичні коливання тягового струму. Запропоновано ряд заходів для покращення форми тягового струму ЕРС та зменшення непродуктивних втрат у його силовому колі, що і призводить до підвищення ефективності електроспоживання ЕРС постійного струму.

Ключові слова: електрорухомий склад, випадкові процеси, напруга, струм, інтергармоніки, електричні процеси, потужності, неактивна, непродуктивні втрати, енергія.

АННОТАЦІЯ

Саблин О.И. Повышение эффективности электропотребления электроподвижного состава постоянного тока. – Рукопись.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2009.

Диссертация посвящена повышению эффективности электропотребления электроподвижного состава системы тяги постоянного тока за счет снижения непроизводительных потерь электроэнергии, определенных на основе исследований баланса реальных электроэнергетических процессов, протекающих в силовых тяговых цепях.

Напряжение на токоприемнике и тяговый ток ЭПС постоянного тока представляют собой незергодические стационарные случайные процессы с одномерным нормальным распределением в сечении. Установлен уровень и диапазон частот низкочастотных периодических колебаний (интергармоник), возникающих в случайных процессах напряжения и тока ЭПС в результате квазипериодического характера электропотребления и регулирования в широком диапазоне мощности ЭПС.

Адаптированы методы определения составляющих полной мощности и коэффициента мощности к системам ЭПС постоянного тока, где ЭПС рассматри-

вается в виде пассивного параметрического двухполюсника, входными воздействиями которого являются случайные процессы напряжения на токоприемнике и тягового тока.

Установлено, что тяговая нагрузка ЭПС удовлетворяет основным признакам потребления неактивной мощности, состоящей в общем случае из реактивной мощности и мощности искажения. Вследствие этого коэффициент мощности ЭПС постоянного тока в тяговых режимах существенно ниже единицы, выделены основные факторы, оказывающие на него влияние. Низкие значения коэффициента мощности ЭПС указывают на повышенный уровень потерь энергии при электропотреблении.

Обосновано влияние формы потребляемого тока на значение коэффициента мощности ЭПС в любой момент времени путем введения мгновенного коэффициента мощности. Коэффициент мощности ЭПС существенно снижается при переходных эксплуатационных режимах работы – при включении-выключении тяги и регулировании мощности. Предложено прогнозировать коэффициент мощности на основе тяговых расчетов.

Исследовано влияние нестационарного режима электропотребления на производительные электрические потери в силовой цепи, а, следовательно, и на коэффициент полезного действия ЭПС в эксплуатационных режимах. Нестационарный режим электропотребления ЭПС приводит к искажению формы потребляемого тока по отношению к форме приложенного к токоприемнику напряжения, а также к наличию низкочастотных периодических технологических колебаний тягового тока, что проявляется в виде увеличенного уровня потерь электроэнергии при тех же потребляемых мощностях.

Предложены дополнительные критерии эффективности электропотребления ЭПС постоянного тока, использование которых при осуществлении технологического процесса ведения поезда позволяет снизить уровень нестационарности электропотребления ЭПС, это критерии: минимума потерь электроэнергии; минимизации пиковых значений потребляемого тока; равномерного электропотребления; устранения обратных потоков энергии. Для их выполнения в системе электрической тяги необходимо применение определенных мероприятий.

Для улучшения формы тягового тока ЭПС рассмотрена возможность применения следующих мероприятий: разработка оптимальных по критерию потерь мощности и коэффициента мощности режимных карт ведения поездов; компенсация неактивной составляющей тягового тока ЭПС; компенсация низкочастотных периодических колебаний (интергармоник) тягового тока ЭПС; стабилизация переменной тяговой нагрузки ЭПС на основе применения автономных накопителей электроэнергии; уменьшение избыточной мощности ЭПС с помощью рационального регулирования его установленной мощности путем оперативного отключения необходимого количества тяговых двигателей.

Результаты диссертационной работы приняты к использованию в Государственном предприятии «Днепропетровский научно-производственный комплекс «Электровозостроение» и в локомотивном депо Нижнеднепровск-Узел Приднепровской железной дороги.

Ключевые слова: электроподвижной состав, случайные процессы, напряжение, ток, интергармоники, электрические процессы, мощности, неактивная, непроизводительные потери, энергия.

ABSTRACT

O. Sablin. The increase of power consumption effectiveness of electric train of the direct current. – Manuscript.

The dissertation on competition for a scientific of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.09 – electrical transport. – Dnepropetrovsk National University of Railway Transportation named after academician V. Lazarjan, Dnepropetrovsk, 2009.

The dissertation paper is devoted to the increase of power consumption effectiveness of the electric train of traction system of the direct current due to reduction of unproductive electric power losses defined on the base of researches of the balance of real electric power processes taking course in the force traction circuits.

Probability static characteristics and spectral analysis of voltage on the current collector and traction current of different types of electric trains have been investigated. It has also been stated that the low frequencies periodic fluctuations (inter harmonics) take place in the stochastic processes of voltage change and traction current of electric train.

Theoretical pre-conditions have been presented and the methods of definition of total power components and power factor have been adapted to the electric train system. The numerical computations and forecasting for electric locomotives and trams have been performed. It has been stated that the power factor for electric trains of direct current is less than one.

The numerical computations of unproductive losses of electric power in force circuit of electric train and its efficiency have been performed. It has been stated that efficiency values are affected by distortions and low frequency periodic fluctuations of traction current. A set of procedures have been suggested in order to improve the form of traction current of electric train and decrease of unproductive losses in its force circuit, that leads to increase of power consumption effectiveness of electric train of direct current.

Key words: electric train, stochastic processes, voltage, current, inter harmonics, electric processes, power, inactive, unproductive losses, energy.