

ВПЛИВ ПІДВИЩЕННЯ НАПРУГИ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ

У статті представлено результати дослідження впливу підвищення напруги у контактній мережі постійного струму на величину втрат енергії у цій контактній мережі. Розрахунки виконані з використанням традиційних загальноприйнятих методик.

В статье представлены результаты исследования влияния повышения напряжения в контактной сети постоянного тока на величину потерь в этой контактной сети. Расчеты выполнены с использованием традиционных общепринятых методик.

In the article the results of study of the influence of rising the voltage in DC contact network on the value of losses in this contact network are presented. The calculations are executed with use of traditional commonly accepted techniques.

Вступ

Електрифікація залізниць є найважливішою ланкою технічного прогресу на транспорті. Переконання у тому, що електричний транспорт як вид транспорту є найбільш економічним і екологічно чистим, не вимагає довгих пояснень. Завдяки електрифікації стало можливим суттєве підвищення пропускної та перевізної здатності залізниць, ефективності роботи з перевезень, поліпшення умов праці, зниження витрат паливо-енергетичних ресурсів. Електрифікація залізничних магістралей сприяла електрифікації промисловості в цілому, оскільки тягові підстанції, що живлять розподільчі мережі, використовуються не лише для потреб електричної тяги, але й для забезпечення електроенергією промислових підприємств, а також підприємств сільського господарства в районах, суміжних із залізницями [1, 2, 3].

На початку електрифікації залізниць застосовувалися системи постійного струму напругою 1,5 кВ та 3 кВ, щоправда у 1947 р. було прийняте рішення про припинення електрифікації напругою 1,5 кВ та перевід ліній, що були раніше електрифіковані за такою системою, на робочу напругу 3 кВ. Вже до 1957 р. роботи з переведення було закінчено. Одночасно із системою 3 кВ постійного струму отримує розповсюдження система змінного струму 25 кВ. Вже за два десятиріччя вводиться в дослідницьку експлуатацію ділянка, електрифікована за системою 2×25 кВ [1].

Разом із переходом залізниць на електричну тягу розвитку набуває і транспортна енергетика. В наступні роки нерентабельні, малопотуж-

ні електростанції закриваються, а залізничні споживачі під'єднуються до державних енергосистем. Через розподільні мережі та тягові підстанції залізничного транспорту електрична енергія передається і нетранспортним споживачам, що розміщені в суміжних із залізницями районах.

Багаторічна практика експлуатації електричної тяги показала свої високі переваги не лише у порівнянні з дизельною тягою.

Зі зростанням основного енергоресурсу для залізниці – електричної енергії та підвищенням ваги потягів, зміни швидкісних режимів, а також інтенсивності та завантаженості діючих залізничних маршрутів на перший план все частіше починають виступати питання щодо економічності електроенергії, модернізації систем електроспоживання і т.ін. Одним із найвигідніших з економічної точки зору є підвищення живлячої напруги в контактній мережі [4].

Варто сказати, що проблема підвищення напруги в контактній мережі постійного струму не є новою. Вона неодноразово досить гостро поставала на різних етапах розвитку залізничного транспорту. Вперше це питання загострилося у зв'язку із тим, що в 60-ті роки почали різко зростати вантажопотоки на ділянках, електрифікованих постійним струмом. Разом із тим зростали швидкість та вага поїздів. Враховуючи всі ці негативні, з точки зору живлення рухомого складу, фактори, було прийнято рішення про підсилення систем електрозабезпечення найбільше завантажених районів залізниць. З цього приводу було висунуто ряд пропозицій, таких як переведення даних ділянок на системи живлення змінним струмом, а також

використання різних прийомів щодо обладнання та експлуатації додаткових підстанцій. Але найбільш економічно та технічно вигідною була пропозиція про підвищення напруги в контактній мережі. Це пояснюється тим, що встановлювати додаткові підстанції дорого, а переводити вантажонапружені ділянки на змінний струм, використовуючи при цьому тисячі технологічних вікон, просто не видавалося можливим. Тому найбільш раціональним було рішення про переведення інтенсивно завантажених ділянок на живлення підвищеною напругою [2].

Сьогодні з'являються ідеї про те, щоб підвищувати напругу не тільки в мережі постійного струму, а й мережах змінного також. Так, в контактну мережу постійного струму пропонується подавати замість звичних 3 кВ – 6, 12 або 24 кВ. Мета, яку маємо досягти в ході цих заходів, – зниження тягового струму локомотива, що тягне за собою зменшення втрат електричної енергії в контактній мережі.

Мета роботи

Дослідити вплив збільшення напруги в контактній мережі на величину втрат електричної енергії при потужностях електровозів в діапазоні від 3000 до 12000 кВт з метою визначення доцільного рівня підвищення напруги у контактній мережі постійного струму, з точки зору мінімізації рівня втрат електричної енергії.

Матеріал і результати дослідження

В літературних джерелах [1, 3] наведено стандартну методику розрахунку втрат енергії в контактній мережі. Використаємо її для оцінки необхідності проведення вказаних заходів.

Прийmemo наступні початкові умови.

До фідерної зони тягової підстанції входить один перегін, довжина якого складає 10 км. Приймаємо профіль перегону таким, що потяг проходить його зі швидкістю 100 км/год при увімкнених тягових двигунах.

За методикою [1], втрати розраховуються для рельсового кола та кола контактної мережі окремо, тобто відомо, що для одноколісного перегону втрати енергії в рейковому колі визначають за формулою:

$$\Delta W_p = r_p \sum_{q=1}^s \left[\frac{1}{TU_k^2} \sum_{i=1}^{n_q} W_{iq} \sum_{j=1}^{n_q} \bar{v}_{jqif} W_{jq} + T \sum_{i=1}^{n_q} \bar{v}_{iqiq} D[I]_{iq} \right]. \quad (1)$$

У формулі (1) прийнято наступні позначення:

r_p – опір 1 км рейкового кола, Ом/км;

T – заданий розрахунковий період, год;

U_k – номінальна напруга в контактній мережі, В;

W_{iq} – енергія, що споживається всіма потягами на i -тому перегоні, q -тій колії за період T , кВт·год;

\bar{v}_{iqiq} – коефіцієнт взаємного зв'язку між точками прикладання навантаження I_{iq} та I_{iq} рейкового кола;

$D[I]_{iq}$ – дисперсія струму i -го перегону q -тої колії, A^2 ;

Якщо у формулу (1) замість r_p підставити $r_p + r_{кп}$, де $r_{кп}$ – опір 1 км контактного дроту, Ом/км, то отримаємо повні втрати енергії на одноколісному перегоні.

$$\Delta W_p = r_p + r_{кп} \sum_{q=1}^s \left[\frac{1}{TU_k^2} \sum_{i=1}^{n_q} W_{iq} \sum_{j=1}^{n_q} \bar{v}_{jqif} W_{jq} + T \sum_{i=1}^{n_q} \bar{v}_{iqiq} D[I]_{iq} \right]. \quad (2)$$

Дисперсія – міра розкиду випадкової величини (у даному випадку тягового струму), тобто відхилення від математичного очікування цієї самої величини [1].

Перед тим, як розраховувати втрати енергії, необхідно визначитися з дисперсією тягового струму. Для цього скористаємось стандартною методикою, що наводиться в довідниковій літературі [1]. Нехай на нашому умовному перегоні не використовується рекуперація, це припущення суттєво спростить математичні розрахунки.

Отже, дисперсія тягового струму на одноколісному перегоні визначається за формулою:

$$D[I]_j = \frac{1}{T^2 U_k^2} \cdot \left(1,1T \sum_{g=1}^v \frac{N_{gj}}{t_{gjit}} W_{gj}^2 - W_j^2 \right), \quad (3)$$

де N_{gj} – кількість потягів типу g , які пройдуть по j -тому перегону за період часу T ;

t_{gjit} – час споживання енергії потягом типу g на перегоні i , год;

W_{gj} – енергія, що споживається потягом типу g при русі по перегону j за період часу T , кВт·год;

W_j – енергія, що споживається усіма поїздами на перегоні j за період часу T , кВт·год.

Приймаємо всі поїзди, що рухаються перегonom, однотипними, тобто $g=1$. Кількість поїздів за період складає $N_{11}=10$. Нехай всі поїзди рухаються перегonom з однаковою швидкістю, отже, час споживання енергії поїздом на перегоні дорівнює $t_{11T}=0,1$ години. Прийmemo розрахунковий період часу $T=1$ година. Визначимо дисперсію тягового струму для напруги в контактній мережі в 3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ та при потужності локомотивів 3000 кВт, 6000 кВт, 9000 кВт, 12000 кВт. Використовуючи формулу (3), отримаємо значення дисперсії, які наведемо в табл. 1.

Значення дисперсії тягового струму при різних значеннях напруги контактної мережі та потужності електровозів

Потужність електровоза, кВт	Напруга контактної мережі, кВ			
	3	6	12	24
3000	0,1	0,025	0,00625	0,0015625
6000	0,4	0,1	0,025	0,00625
9000	0,9	0,225	0,056	0,014
12000	1,6	0,4	0,1	0,025

Отримані результати розрахунків представимо у вигляді графіків (рис. 1).

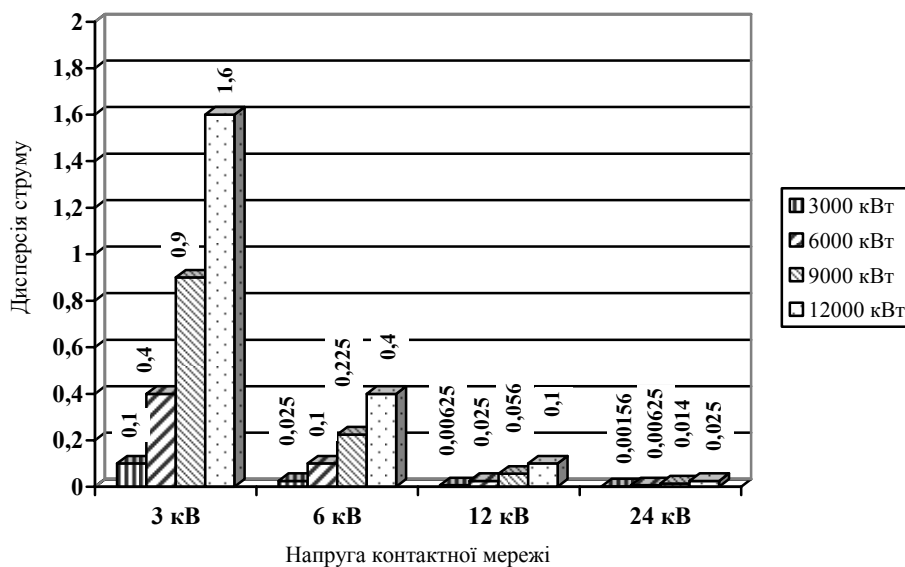


Рис. 1. Діаграма, що ілюструє зміну значень дисперсії тягового струму при різних напругах контактної мережі та різній потужності електровозів

Аналіз наведених на рис. 1 даних показує, що збільшення напруги тягне за собою зменшення величини тягового струму, а відповідно і його дисперсії. Відбувається це наступним чином: при збільшенні напруги в контактній мережі в два рази величина дисперсії струму зменшується в 4 рази, при збільшенні напруги в 4 рази дисперсія зменшується в 16 раз та при збільшенні напруги у 8 разів – дисперсія зменшується в 64 рази. Маємо чітку квадратичну зворотну залежність.

В той самий час збільшення потужності електровозу приводить до збільшення значення дисперсії. Таким чином, збільшення потужності в 2 рази викличе чотирикратне збільшення дисперсії тягового струму; збільшення потуж-

ності в три рази – збільшення дисперсії в 9 раз, і т.д. Дисперсія тягового струму прямо пропорційна квадрату потужності електровоза та обернено пропорційна квадрату живлячої напруги.

Розглянемо вплив зміни напруги в контактній мережі та потужності електровозів на величину втрат енергії в ній.

Нехай для живлення рухомого складу на умовній ділянці контактний дріт типу МФ-150, опір якого складає $r_{кп}=0,118$ Ом/км, а опір одного кілометра рейок Р-65 дорівнює $r_p=0,0127$ Ом/км. Середній коефіцієнт взаємного зв'язку між точками прикладення навантаження прийmemo таким, що дорівнює $\bar{v}_{iqiq}=5$. Підставивши значення потужності

електровоза, напруги контактної мережі та дисперсії тягового струму, можемо за формулою (2) визначити величину втрат енергії та їх залежність від напруги та потужності в абсолютних одиницях. Результати розрахунків занесемо до табл. 2.

Таблиця 2

Значення втрат енергії при різних значеннях живлячої напруги контактної мережі та різних потужностях електровозів (в абсолютних величинах)

Потужність електровоза, кВт	Напруга контактної мережі, кВ			
	3	6	12	24
3000	0,654	0,163	0,041	0,01
6000	2,614	0,654	0,163	0,041
9000	5,882	1,47	0,368	0,092
12000	10,456	2,614	0,654	0,163

Аналізуючи дані, що наведені в табл. 2, зазначимо: збільшення живлячої напруги вдвічі, при потужності електровозів 3000 кВт тягне за собою зменшення втрат енергії в 4,012 разу, при збільшенні напруги в чотири рази – 15,951 разу; при збільшенні напруги у вісім разів – втрати зменшуються в 65,4 разу. Майже ті ж самі співвідношення можна спостерігати і для потужностей електровозів 6000, 9000, 12000 кВт. Зміну величини витрат електричної енергії в абсолютних значеннях при зміні напруги контактної мережі наочно представимо на рис. 2 та 3.

Метою проведених досліджень є визначен-

ня доцільного рівня підвищення напруги у контактній мережі постійного струму з точки зору мінімізації рівня втрат електричної енергії. Для цього перейдемо від абсолютних величин втрат енергії до відносних (див. табл. 3).

Таблиця 3

Значення втрат енергії при різних значеннях живлячої напруги контактної мережі та різних потужностях електровозів (у відносних величинах)

Потужність електровоза, кВт	Напруга контактної мережі, кВ			
	3	6	12	24
3000	100,00 %	24,92 %	6,27 %	1,53 %
6000	100,00 %	25,02 %	6,24 %	1,57 %
9000	100,00 %	24,99 %	6,26 %	1,56 %
12000	100,00 %	25,00 %	6,25 %	1,56 %

Розрахунки проведені виходячи з умови рівності 100 % втрат потужності для напруги у контактній мережі 3 кВ, для кожної з потужностей електровоза.

За даними табл. 3 визначимо відносне зменшення втрат потужності (у %) при переході від однієї системи живлення до іншої.

Величина відносного приросту втрат енергії дає уяву про те, як інтенсивно зменшуються втрати з підвищенням напруги в живлячій мережі.

Аналізуючи наведені на рис. 4 дані, відзначимо, що підвищення напруги в контактній мережі до 6 кВ дозволяє зменшити втрати на 75 %.

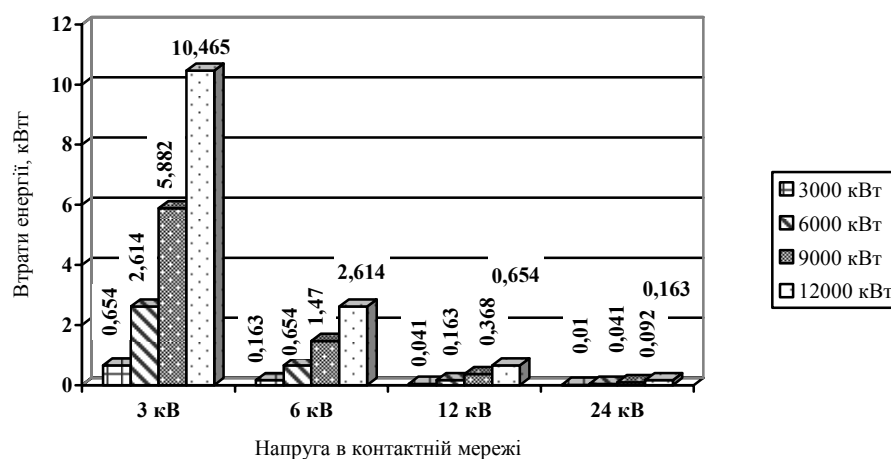


Рис. 2. Діаграма, що ілюструє зміну значення втрат електричної енергії в контактній мережі при різних напругах та потужностях електровозів

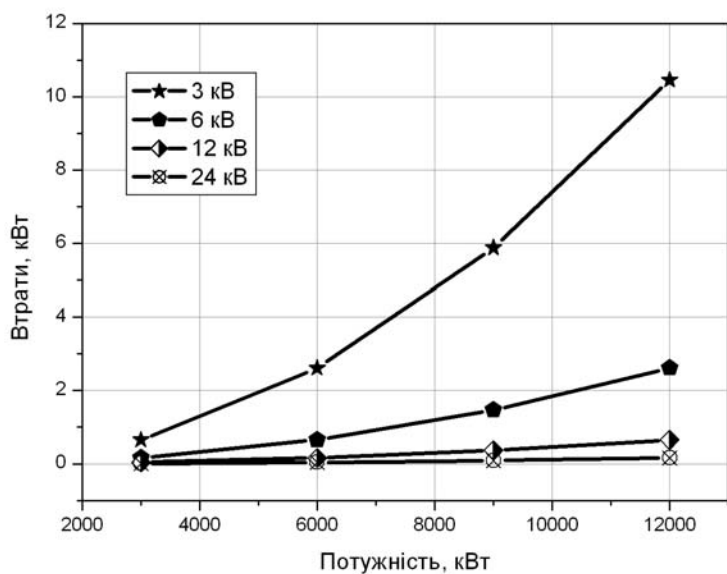


Рис. 3. Залежність між потужністю електровоза та втратами енергії при різних напругах у контактній мережі

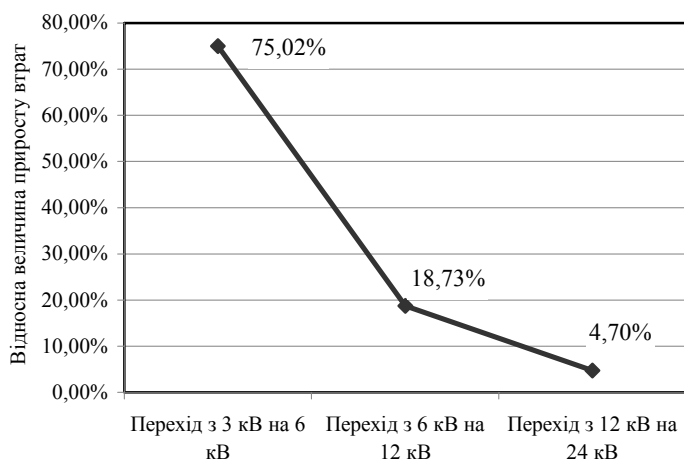


Рис. 4. Графік зміни величини відносного зменшення втрат при переході з однієї напруги живлення на іншу

Це досить суттєве зменшення. Якщо ж далі підвищити напругу до 12 кВ, то додатковий вигрaш у зменшенні втрат сягатиме майже 19 % (18,73 %) відносно до втрат при напрузі 6 кВ. При переході з 12 кВ на 24 кВ приріст втрат складає лише 4,70 %, відносно до втрат при напрузі 12 кВ (див. табл. 4).

Порівнюючи усі три значення приросту втрат, зробимо висновок, що найбільш доцільними є заходи щодо підвищення напруги в контактній мережі до 6...12 кВ. Підвищення ж до 24 кВ не має сенсу, бо низький приріст втрат енергії не покриє значних капіталовкладень у впровадження систем живлення такого типу.

Суттєвою перевагою у виборі між двома напругами є той факт, що для того, аби подавати в контактну мережу замість 3 кВ шість, не потрібно великих витрат. Система 6 кВ будується на базі існуючих тягових підстанцій шляхом перемикання схем випрямлячів [6]. Живлення від такої системи можна застосовувати на всіх ділянках, що електрифіковані постійним струмом, а особливо на тих, що мають великий вантажообіг та значну інтенсивність руху поїздів.

На ділянках із складним профілем, а також там, де рухаються переважно потяги великої ваги, більш раціональним є застосування системи живлення напругою 12 кВ постійного струму.

Таблиця 4

**Величини приростів втрат при переході
від однієї системи живлення до іншої**

Потужність електровоза, кВт	Перехід з 3 кВ на 6 кВ	Перехід з 6 кВ на 12 кВ	Перехід з 12 кВ на 24 кВ
3000	75,08 %	18,65 %	4,74 %
6000	74,98 %	18,78 %	4,67 %
9000	75,01 %	18,74 %	4,69 %
12000	75,00 %	18,75 %	4,70 %
Середнє значення приросту втрат	75,02 %	18,73%	4,70 %

Це можна пояснити тим, що велика маса потягу вимагає експлуатувати електровози великої потужності. При потужності локомотивів більше 6000 кВт навіть при напрузі 6 кВ мають місце значні втрати енергії. Тому з метою зниження втрат доцільним є застосування більш високої напруги (12 кВ) для живлення електро-рухомого складу.

Зниження величини тягового струму дозволяє зменшити площу перерізу контактної дроти, тобто зменшити кількість міді на його виготовлення. Також зниження струму дозволить більш раціонально використовувати поперечний переріз провідника, бо при меншому значенні величини струму має місце менший вплив поверхневого ефекту; знизить температуру нагріву контактної мережі, отже, збільшить і термін служби контактних дротів.

Загальні висновки

Досить низький рівень розвитку напівпровідникової техніки в 70-ті роки загальмував процес втілення цієї ідеї в життя. Однак теоретичний бік питання прогнозує суттєвий економічний результат від застосування систем живлення підвищеною напругою. Сьогодні, коли силова електроніка вийшла на якісно новий рівень, а вартість енергоресурсів зростає, настає час, коли питання економії електроенергії та підсилення систем енергозабезпечення вихо-

дять на перший план, є нагальна потреба у створенні нових перетворювачів для рухомого складу та переведення існуючих залізниць на живлення системою 6, 12 або 24 кВ постійного струму.

Таким чином, проведені дослідження дозволяють стверджувати, що при потужностях локомотивів до 6000 кВт є доцільним використовувати систему тягового електропостачання постійного струму з напругою 6 кВ, що дає змогу зменшити втрати електричної енергії у контактному дроті та рейковому колі на 75 %. При збільшенні потужностей локомотивів (від 6000 кВт) стає доцільним використовувати системи 12 або 24 кВ. Але враховуючи те, що вигаши у зменшенні втрат від впровадження системи 24 кВ порівняно з 12 кВ не перевищує 5 %, є доцільним використовувати систему 12 кВ. Систему 24 кВ є доцільним використовувати при потужностях від 12000 кВт, наприклад, в системах швидкісного руху.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст]. – Т. 1 / под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
2. Корниенко, В. В. Существующие и перспективные технологии электроснабжения железных дорог [Текст] / В. В. Корниенко, Г. А. Доманская. // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 4. – С. 3-6.
3. Инновации на службе электрификации [Текст] // Евразия вестн. – 2009. – № 10. – С. 8-9.
4. Бадер, М. П. Концептуальные решения по нетрадиционным системам тягового электроснабжения и электромагнитной совместимости [Текст] // Материалы 2-ой Межд. науч.-практ. конф. «Электрификация железнодорожного транспорта «Трансэлектро-2008». – Д.: ДИИТ, 2008. – С. 26.
5. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
6. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст] : учебник для вузов ж.-д. трансп. / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

Надійшла до редколегії 12.01.2010.

Прийнята до друку 18.01.2010.