

В.Г. СИЧЕНКО, Є.М. КОСАРЕВ, П.В. ГУБСЬКИЙ, А.В. РОГОЗА (ДНУЗТ)

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 49010 м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.diit.edu.ua, peter.gybskiy@gmail.com, redyfox@yandex.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

ОЦІНКА ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАВАННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Вступ

Відомо, що впровадження швидкісного руху потребує модернізації системи тягового електропостачання, оскільки висуваються більш жорсткі вимоги до режиму напруги в тяговій мережі та значно зростають тягові потужності. Завдання підвищення енергетичної ефективності електрифікованих ліній в умовах реформування залізничного транспорту є однією з найважливіших проблем. Прагнення забезпечити конкурентоспроможність перевізного процесу потребує збільшення швидкості руху пасажирських поїздів до 250-300 км/год, формування великовагових потягів, організації пакетного графіку руху без зниження рівня безпеки при високих показниках якості споживаної електроенергії і безумовному виконанні графіку руху потягів.

Найбільш серйозні проблеми виникають при організації швидкісного та великовагового руху на ділянках постійного струму. Досвід показав, що швидкісний рух характеризується різкозмінним імпульсним електроспоживанням. Збільшення об'єму перевезень та організація руху швидкісних та високошвидкісних поїздів призводить до того, що пристрої тягового електропостачання обмежують пропускну спроможність ділянки електрифікованої залізниці внаслідок зниження напруги на струмоприймачі електрорухомого складу нижче нормованих значень. Удосконалення режиму напруги в тяговій мережі застосовуваними нині засобами, як було показано [1], не вирішує існуючу проблему повною мірою, через збільшення техно-

логічних втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат.

У цих умовах традиційні способи підсилення (будівництво додаткових тягових підстанцій, пунктів паралельного з'єднання та ін.) виявляються малоефективними і неекономічними. В той же час, використання встановленої на тягових підстанціях потужності у більшості випадків не перевищує 30-40%.

Постановка задачі дослідження

Існуючі системи електропостачання електрорухомого складу, які мають значну встановлену потужність тягових підстанцій, не дозволяють забезпечити потрібний рівень питомої потужності тягової мережі в межах 1,5 – 2 МВт/км. Використання застосовуваних останнім часом засобів підсилення в багатьох випадках не забезпечує необхідних енергетичних показників і є досить дорогими. Перелічені фактори створюють передумови до заміни централізованої системи тягового електропостачання децентралізованою.

Принципи побудови цих систем були сформульовані проф. Марквардтом К. Г. ще в середині минулого століття. Економічний ефект досягається за рахунок зменшення перерізу проводів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі і збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного устаткування при зниженні його встановленої потужності. Підсилення на основі розподіленого живлення передбачає перехід до нової схемотехніки тягової мережі (рис. 1).

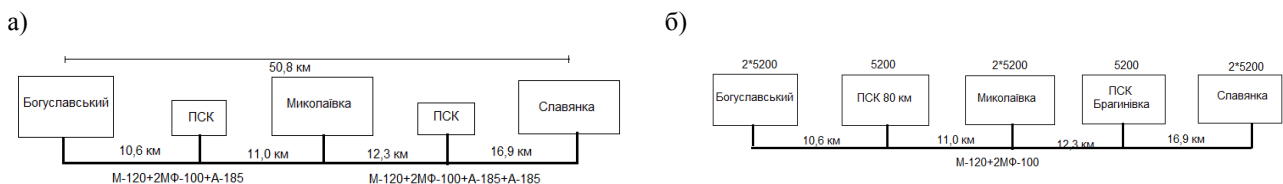


Рис. 1. Схема заміщення ділянки: а) при централізованому живленні; б) при розподіленому живленні

При проведенні порівняльних оціночних розрахунків систем живлення приймалися наступні припущення: електровози споживають постійний і незмінний за величиною струм, поїзди рухаються рівномірно із постійною встановленою швидкістю 160 км/год, не враховується час на розгін та гальмування, загальний час ходу всіх поїздів розрахунковою зоною становить 15 хв, напруга на шинах тягових підстанцій є сталою та незмінною за величиною у часі, внутрішні опори тягових підстанцій приймаються рівними. Результати порівняльного розрахунку наведених схем показують, що втрати електроенергії при реалізації заданого графіку руху поїздів при застосуванні схеми розподіленого живлення склали 104,21 кВт·год, що на 35,9 % менше від втрат електроенергії при централізованому живленні.

Необхідно вказати, що окрім втрат електричної енергії, величина яких має значний вплив на техніко-економічні показники мережі, оскільки вартість втрат енергії включається в розрахункову вартість (приведені затрати) та собівартість (річні експлуатаційні затрати) передачі електричної енергії ефективність транспорту електричної енергії визначається також і якістю електричної енергії в тяговій мережі.

В результаті процесів споживання електричної енергії та резонансів в тяговій мережі зростають струми та напруги вищих гармонік. Тому, при розрахунку режимів функціонування тягової мережі, необхідно враховувати амплітудно-частотні характеристики реактивного і активного опору елементів. Не менш важливим фактором є величина навантаження. Розрахунок амплітудно-частотних характеристик суттєво ускладнюється необхідністю врахування розподіленості параметрів ліній тягового електропостачання [2].

Метою цієї роботи є розробка одного з методологічних підходів при проведенні порівняльного аналізу різних типів схем живлення тягової мережі з урахуванням параметрів ліній живлення, що дозволяє більш точно враховувати втрати потужності в тяговій мережі.

Методика розрахунку

Розрахунок централізованої та розподіленої систем тягового електропостачання постійного струму проводився на імітаційній моделі згідно методики розрахунку миттєвих схем [3].

1. *Централізоване живлення: Розрахунок за середнім значенням струму ЕРС*

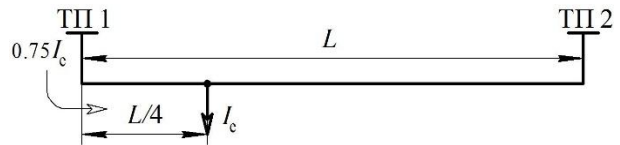


Рис. 2. Розрахункова ділянка

Розрахункові умови: Схема живлення – двостороння, довжина міжпідстанційної зони $L=20$ км, ЕРС знаходиться на відстані $x=5$ км від ТП 1, потужність тягових підстанцій $P=25$ МВт, внутрішній опір тягової підстанції $\rho=0,036$ Ом, тягова мережа М120+2МФ100+А185+Р65, струм, споживаний ЕРС за період (рис. 3), середній струм ЕРС за період $I_e=1954,55$ А.

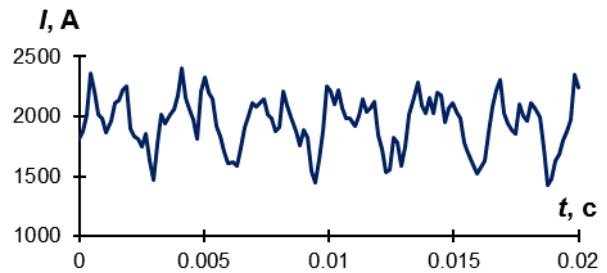


Рис. 3. Осцилограма струму ЕРС

Розрахунок внутрішнього опору тягових підстанцій проводився відповідно до [3] та за умови, що на кожній з тягових підстанцій розташовано 2 перетворювальні агрегати з дванадцятипульсовою схемою випрямлення, один з яких знаходиться в роботі.

Відповідно до рис. 2, струм фідера тягової підстанції ТП 1 буде становити:

$$I_{\phi 1} = 0,75 \cdot I_e. \tag{1}$$

Тоді, миттєві втрати потужності будуть:

$$\Delta P = 0.75 \cdot I_e^2 \cdot r_0 \cdot \frac{L}{4}. \tag{2}$$

2. *Розподілене живлення: Розрахунок за середнім значенням струму ЕРС*

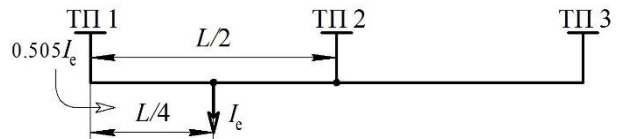


Рис. 4. Розрахункова ділянка

Розрахункові умови: Схема живлення – двостороння, довжина міжпідстанційної зони $L/2=10$ км, ЕРС знаходиться на відстані $x=5$ км від ТП 1, потужність тягових підстанцій $P=6$ МВт, внутрішній опір тягової підстанції $\rho=0,054$ Ом, тягова мережа

M120+2MФ100+A185+P65, струм, споживаний ЕРС за період (рис. 3), середній струм ЕРС за період $I_e=1945,55$ А.

Розрахунок внутрішнього опору тягових підстанцій проводився відповідно до [3] та за умови, що на кожній з тягових підстанцій розташовано по одному перетворювальному агрегату з дванадцятипульсною схемою випрямлення.

Відповідно до рис. 4, струм фідера тягової підстанції ТП 1 буде становити:

$$I_{\phi 1} = 0,505 \cdot I_e. \quad (1)$$

Тоді, миттєві втрати потужності будуть:

$$\Delta P = 0.505 \cdot I_e^2 \cdot r_0 \cdot \frac{L}{4}. \quad (2)$$

3. Централізоване живлення: Розрахунок з урахуванням втрат від ВГ

Визначення зміни опору в заданому діапазоні частот виконувалось за допомогою імітаційної моделі [2], побудованої на основі схеми заміщення довгих ліній. В результаті моделювання отримано зміну опору розрахункової ділянки в заданому діапазоні частот рис. 5.

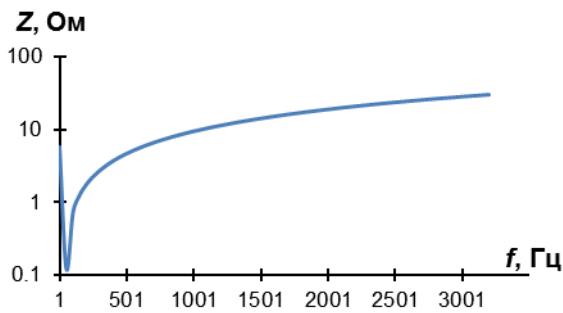


Рис. 5. АЧХ централізованої СТЕ

Спектральний склад струму, отриманий шляхом розкладання в ряд Фур'є струму ЕРС та зображений на рис. 6 (спектр показаний без постійної складової).

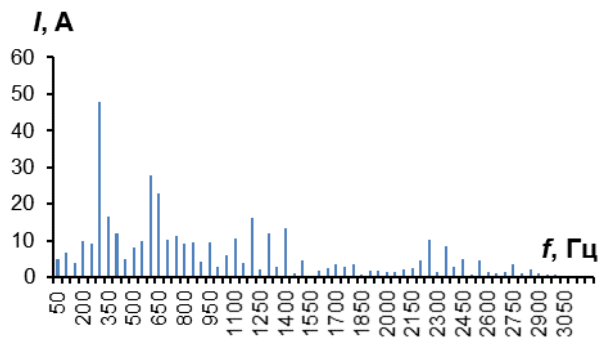


Рис. 6. Спектральний склад струму ЕРС

Втрати потужності з урахуванням оціночних втрат від вищих гармонік визначались за формулою [4]:

$$\Delta S = \sum_n^m I_n^2 \cdot Z_n, \quad (1)$$

де I_n – значення струму n -ї гармоніки, А;

Z_n – значення опору на частоті n -ї гармоніки, Ом.

4. Розподілене живлення: Розрахунок з урахуванням втрат від ВГ

Розрахунок втрат потужності з урахуванням втрат від вищих гармонік проводився за аналогією розрахунку для централізованої системи. Відмінність полягала лише в імітаційній моделі, яка враховувала додаткову тягову підстанцію. Залежність опору розподіленої системи від частоти показано на рис. 7.

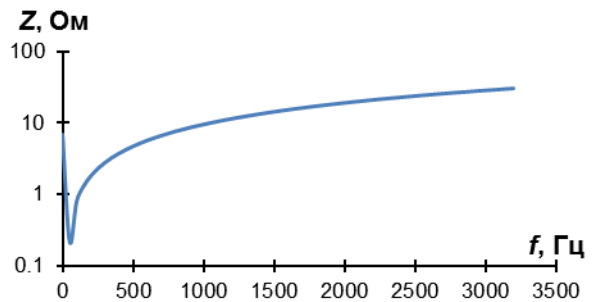


Рис. 7. АЧХ розподіленої СТЕ

Результати розрахунку

Результати розрахунків приведені на рис. 8-9 та зведені в таблицю 1.

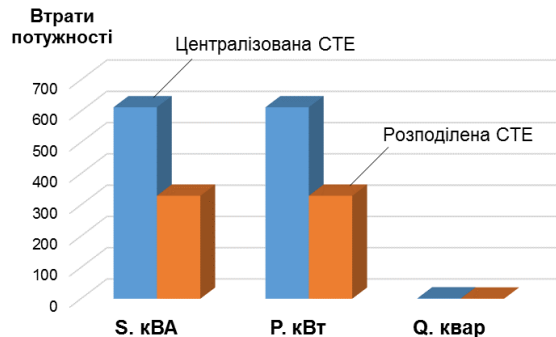


Рис. 8. Втрати потужності з урахуванням втрат від ВГ

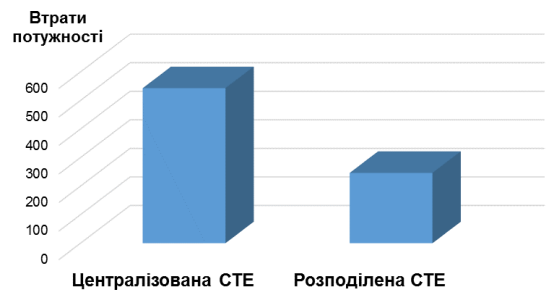


Рис. 9. Втрати потужності без урахування втрат від ВГ

Результати імітаційного моделювання порівняльного аналізу схем живлення

| Найменування показника | Централізоване живлення | | | Розподілене живлення | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------|------------|----------|
| | без урахування вищих гармонік | з урахуванням вищих гармонік | | без урахування вищих гармонік | з урахуванням вищих гармонік | | |
| Середній струм ЕРС, А | 1945,55 | 1945,55 | | 1945,55 | 1945,55 | | |
| Середній струм фідера, А | 1459,55 | 1459,55 | | 982,5 | 982,5 | | |
| Середні втрати напруги, В | 372,18 | 451,32 | | 250,5 | 304,1 | | |
| Втрати потужності | кВА | 542,93 | ΔS | 612,11979 | 246,15 | ΔS | 329,4787 |
| | кВт | | ΔP | 612,11968 | | ΔP | 329,4784 |
| | квар | | ΔQ | 1,102138 | | ΔQ | 0,5012 |
| Частка втрат від вищих гармонік, % | – | 0,18 | | – | 0,15 | | |

Висновки

Рівень енергоспоживання та ощадливе використання електричної енергії на сьогоднішній день є одним з визначальних факторів при впровадженні швидкісного та великовагового руху на електрифікованих залізницях. Це потребує, нарівні з впровадженням нової техніки, розробки нових підходів до схемотехніки тягової мережі. Проведені попередні

оціночні розрахунки показують, що при застосуванні системи тягового електропостачання розподіленого типу втрати потужності та напруги в тяговій мережі значно менші (54,7 і 32,7%, відповідно) при значно меншій потужності тягових підстанцій. Це дає підставу для подальших досліджень з метою технічної реалізації системи розподіленого живлення на залізницях постійного струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аржанников, Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 207 с.
2. Сиченко В.Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму / Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна, Вип. 38 – 2011, - с. 73-76.
3. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.

Надійшла до друку 10.12.2016.

REFERENCES

1. Arzhannykov, B. A. *Tyagovoe elektrosnabzhenye postoyannoho toka skorostnoho y tyazhelovesnoho dvyzheniyya poezdov* [Traction power supply DC high-speed and heavy train traffic]. Ekaterinburg, USURT Publ., 2012. 207 p.
2. Sychenko, V. G. *Modelyuvannya elektromahnitnykh protsesiv u tyahoviyi merezhi postiynoho strumu* [Simulation of Electro-Magnetic Process in the Idc Electric Traction Network] *Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. ak. V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2011, no. 38, p. 73 – 76.
3. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Electricity electric-infected railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
4. Bessonov L. A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniky. Elektricheskiye tsepy* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2006. 701 p.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В.Г.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П.Д.*

Впровадження швидкісного та великовагового руху на електрифікованих залізницях постійного струму висвітлює деякі протиріччя – при наявній надлишковій потужності тягових підстанцій в тяговій мережі не забезпечується необхідний рівень напруги та питомої потужності. Оскільки відомі існуючі способи підсилення недостатньо ефективні та й не отримали широкого впровадження в Україні, пропонується перехід до нової схемотехніки тягової мережі – розподіленого типу. В статті висвітлюється один з аспектів такого переходу – оцінка і порівняльний аналіз втрат потужності в порівнюваних системах централізованого та розподіленого типу з урахуванням втрат від вищих гармонійних складових.

Ключові слова: втрати потужності, система розподіленого живлення, тягова мережа, швидкісний рух.

УДК 621.331.3

В.Г. СЫЧЕНКО, Е.Н. КОСАРЕВ, П.В. ГУБСКИЙ, А.В. РОГОЗА (ДНУЖТ)

Кафедра «Интеллектуальные системы электроснабжения» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, 49010 г. Днепропетровськ, ул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.diit.edu.ua, peter.gybskiy@gmail.com, redyfox@yandex.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Внедрение скоростного и тяжеловесного движения на электрифицированных железных дорогах постоянного тока осветило некоторые противоречия – при имеющейся избыточной мощности тяговых подстанций и в тяговой сети не обеспечивается необходимый уровень напряжения и удельной мощности. Поскольку известные существующие способы усиления недостаточно эффективны и не получили широкого внедрения в Украине, предлагается переход к новой схемотехники тяговой сети – распределенного типа. В статье освещается один из аспектов такого перехода – оценка и сравнительный анализ потерь мощности в сравниваемых системах централизованного и распределенного типа с учетом потерь от высших гармонических составляющих.

Ключевые слова: потери мощности, система распределенного питания, тяговая сеть, скоростное движение.

Внутренний рецензент *Кузнецов В.Г.*

Внешний рецензент *Андриенко П.Д.*

UDC 621.331.3

V.G. SYCHENKO, YE.M. KOSARIEV, P.V. GUBSKIY, A.V. ROGOZA (DNURT)

Department " Intelligence electrification systems", Dnipropetrovsk national University of railway transport named after Acad. V. Lazaryan, 49010, Dnipropetrovsk, 2 Lazaryana str., tel. +38(056)373-15-25 e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.diit.edu.ua, peter.gybskiy@gmail.com, redyfox@yandex.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

EVALUATION OF ADDITIONAL POWER LOSSES IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF HIGH-SPEED TRAFFIC

The introduction of high-speed and heavy traffic on the electrified railway DC highlighted some contradictions in the existing excess capacity of traction substations and traction networks do not provide the necessary level of voltage and power density. Because there are existing ways of strengthening is not effective enough and not received wide implementation in Ukraine, we offer a transition to the new circuitry traction network – distributed type. The article highlights one aspect of this transition was to evaluate and compare Liny analysis of power losses to compare the centralized and the distributed type, taking into account losses from higher harmonics.

Keywords: power losses, distributed power, traction network, high-speed traffic.

Internal reviewer *Kuznetsov V.G.*

External reviewer *Andriienko P.D.*