

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА НАПРУГОЮ

¹Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна;

²Регіональна філія «Львівська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця»

Розвиток і впровадження швидкісного руху вимагає зміни підходів до модернізації системи тягового електропостачання, оскільки застосовувана система тягового електропостачання постійного струму не завжди може забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і якості. До обмежень, що виникають, відносяться зниження напруги на струмоприймачах електровоза нижче допустимого для нормальної експлуатації значення і нагрів проводів контактної мережі, що зумовлює втрату їх механічної міцності. Процес електроспоживання в тяговій мережі відбувається під впливом різномірних збурень: зміни режимів роботи електрорухомого складу в залежності від особливостей графіка руху поїздів, профілю колії і наявних обмежень, короткочасних відривів струмоприймачів і різного роду перехідних процесів, тому режим напруги в тяговій мережі під впливом цих збурень має нестационарний коливальний характер з різкими змінами напруги, які можуть призвести до зниження стійкості взаємодії системи тягового електропостачання та електрорухомого складу. За наявності таких важкоконтрольованих факторів система може виходити на межу стійкості з різними значеннями параметрів, що впливають. Для оцінки запасу стійкості в вузлах навантаження енергосистем використовуються коефіцієнти запасу за напругою, так як напруга на шинах є основним контрольованим параметром для живлячих розподільних підстанцій. Саме такий підхід, із застосуванням практичних критеріїв стійкості за напругою, і був застосований в цій роботі. Результати розрахунків критеріїв стійкості за напругою при функціонуванні системи тягового електропостачання на реальній ділянці електрифікованої залізниці дозволили встановити статичну нестійкість за напругою в окремих перетинах тягової мережі. Звідси випливає, що існуючі схеми живлення не дозволяють витримувати необхідний режим напруги в тяговій мережі і забезпечувати необхідну стійкість за напругою при швидкісному русі, що зумовлює необхідність переходу до нових схемних рішень систем тягового електропостачання.

Ключові слова: швидкісний рух, система тягового електропостачання, режим напруги, пункт підсилення, стійкість за напругою.

Вступ

Процес електроспоживання в тяговій мережі відбувається під впливом різномірних збурень: зміни режимів роботи електрорухомого складу в залежності від особливостей графіка руху поїздів, профілю колії та наявних обмежень, короткочасних відривів струмоприймачів, різного роду перехідних процесів тощо. Режим напруги в тяговій мережі під впливом цих збурень має нестационарний коливальний характер з різкими змінами напруги, які можуть призводити до низки проблем, таких як буксування, пошкодження зчпних пристроїв або появи кругового вогню на колекторах тощо. Різкий спад напруги супроводжується значним зменшенням струму і сили тяги, що також може бути небезпечним для електрорухомого складу.

Результати досліджень режимів напруги в тяговій мережі та їх впливу на функціонування системи тягового електропостачання за необхідної умови дотримання заданої пропускної здатності висвітлено в багатьох наукових роботах. Сформовані раніше науковцями підходи до оцінки рівня напруги обмежуються визначенням напруги за середніх умов руху або за найбільшої його інтенсивності [1], [2]. Однак, величини цих напруг зовсім недостатні для характеристики функції напруги, як випадкової величини, і тому не можуть дати вичерпного уявлення про режими роботи електрифікованої залізниці. Справа в тому, що для виконання поставленого завдання, є декілька обмежень:

- зазвичай, для режимів роботи електрифікованої ділянки встановлюються три рівні напруги: мінімальна, максимальна та середня. Числові значення цих напруг можуть бути різними для кожної міжпідстанційної зони та мають випадковий характер;

- неможливо встановити закон розподілу напруги в тяговій мережі, тому оцінку змін рівнів напруги на струмоприймачі проводять або для кожного перегону, або відносно заданого Правилами тягових розрахунків [3] рівня 3000 В;

- на рівень напруги у тяговій мережі значний вплив має рівень тягового навантаження, яке є різним для кожної ділянки і має випадковий характер;

- незважаючи на існуючі норми рівнів напруги в тягових мережах, різкоколивальний характер змін напруги на струмоприймачі електровоза робить їх значення «умовними», а закладений в норми великий діапазон змін напруги 2,2...3,85 кВ не дозволяє оптимізувати наперед траєкторію руху потягу навіть за відомої його ваги або заданій швидкості руху.

Вирішення проблеми вбачалося в знаходженні «оптимальної напруги» з регламентованими межами змін, яка забезпечить рух потяга з визначеною швидкістю, необхідною для забезпечення заданого часу ходу по перегону з мінімальними витратами на тягу та втратами потужності [2], [4]. Втрати напруги і електроенергії в тяговій мережі визначаються в основному струмом тягових двигунів електровозів і параметрами тягової мережі. За різних середніх напруг на струмоприймачеві і відповідного підбору режиму ведення поїздів можна отримати однаковий час ходу по ділянці, якому відповідає та ж сама корисна механічна робота по переміщенню потяга. При цьому прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є умовою забезпечення номінального режиму тягових і допоміжних машин електровоза [5]. Виконання цього завдання базується на застосуванні пристроїв регулювання напруги. Такий підхід врешті призвів до створення концепції керованого електропостачання [6], яка реалізована на одній з ділянок Свердловської залізниці.

Однак, на більшості залізниць постійного струму відсутні засоби регулювання напруги, а керівні впливи на її рівень здійснюються малозатратними тривіальними засобами підсилення тягової мережі, які не можуть, як зазначалось вище, забезпечити необхідну стійкість системи тягового електропостачання (СТЕ) за напругою.

Забезпечення стійкої та надійної роботи будь-якої системи є важливою задачею, яка потребує свого розв'язання. На сьогодні не існує чіткої класифікації видів стійкості [7]. Проте, з позицій системного підходу, можна розглядати різні види стійкості: стійкість техніки; технологічну стійкість; організаційну стійкість; стійкість зовнішніх зв'язків; екологічну стійкість; структурну стійкість і т.п. Кожен з видів стійкості впливає на якісні характеристики роботи системи.

Через складність явищ та процесів, що проходять в електроенергетичних системах (ЕЕС), «фізичне» поняття «стійкість» для зручності традиційно розкладають на складові. В країнах колишнього СРСР була досить поширена математична декомпозиція стійкості на поняття «стійкість паралельної роботи енергосистем» та «стійкість навантаження». Водночас, в країнах Європейського енергетичного об'єднання використовується дещо інша класифікація цього явища: «стійкість за кутом» та «стійкість за напругою». Зазначені різні математичні формалізації по різному розглядають єдину фізичну суть стійкості енергосистем, але ні якою мірою не протирічать одна одній. При цьому, такий підхід дозволяє чіткіше розділити загальне поняття на окремі математичні складові. Крім того, враховуючи перспективи України щодо входження до Європейської Енергетичної Спільноти, доцільно певним чином визначитися та залучити до використання сучасні світові підходи щодо аналізу стійкості режимів енергосистем [8].

Розрахунки стійкості виконуються під час проектування та експлуатації енергосистем, а саме: вибір схеми живлення ЕЕС та уточнення розміщення основного обладнання; визначення допустимих режимів системи; вибір заходів щодо підвищення стійкості ЕЕС при зміні схеми живлення; визначення параметрів налаштування систем регулювання та керування, релейного захисту, АПВ тощо. Крім того, розрахунки стійкості проводяться під час розробки та уточнення вимог до основного обладнання ЕЕС, релейного захисту, автоматики та систем регулювання за умовами стійкості ЕЕС.

Стійкість за напругою — це здатність енергосистеми підтримувати стійкі та прийнятні рівні напруги на всіх системах шин (СШ) як в нормальних, так і в післяаварійних та ремонтних режимах. Критерій стійкості енергосистеми за напругою полягає у тому, що в поточному режимі на кожній СШ зі збільшенням напруги величина реактивної потужності на тій самій СШ повинна збільшуватись. Динамічна стійкість за напругою пов'язана з оцінкою та підтримкою напруги впродовж 1...2 секунди відразу після великого збурення. Статична стійкість за напругою належить до форми стійкості, що визначається переважно статичними характеристиками навантаження та

параметрами мережі. Статичну стійкість оцінюють за допомогою значення коефіцієнта запасу з напруги K_U у вузлах навантаження. Цей коефіцієнт визначається за формулою [9]

$$K_U = \frac{U - U_{\text{кр}}}{U_{\text{кр}}},$$

де $U_{\text{кр}}$ — це критична напруга у вузлі, за СОУ-Н-МЄВ 40.1-00100227-68:2012 [9].

Величина критичної напруги береться $0,7U_{\text{ном}}$. Зазначимо, що у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць оперативне керування режимами функціонування має суттєві відмінності від практики електроенергетичних систем [10]. Вони полягають у фактичній відсутності засобів регулювання режимів та моніторингу показників функціонування СТЕ. У кращому випадку енергодиспетчер має інформацію про рівні напруги на шинах тягового навантаження та величини споживаних струмів фідерів. За наявною телеметричною інформацією про склад увімкненого обладнання за відомих схем живлення енергодиспетчер здійснює керування режимом, взаємодіючи з поїздним диспетчером з урахуванням реальної пропускної спроможності електрифікованої ділянки. За навантажувальною здатністю контактної мережі визначається мінімальний міжпоїздний інтервал для забезпечення сталої роботи СТЕ. При цьому у енергодиспетчера відсутній інструментарій для оцінки стійкості за напругою.

Метою роботи є кількісна оцінка стійкості системи тягового електропостачання за напругою згідно зі встановленими в електроенергетичних системах галузевими вимогами.

Результати дослідження

Відомо, що напруга на струмоприймачах електровозів навіть за нормальної схеми живлення міжпідстанційних зон змінюється у значних межах. При цьому, чим більша потужність споживається електровозом, тим більші межі змін. Оцінка впливу стійкості СТЕ за напругою має суттєве значення для функціонування електрорухомого складу. Це визначається тим, що у деяких випадках різкі зміни напруги можуть призвести до надмірного підвищення струму двигунів та тягових зусиль. Особливо неприємні наслідки при цьому можуть виникнути у разі роботи електровоза в режимі рекуперативного гальмування. Точне розв'язання поставленої задачі надзвичайно ускладнене необхідністю розрахунку нелінійних залежностей, які визначають режими роботи СТЕ і ЕРС. Тут необхідно звернути увагу, що рівень напруги в тяговій мережі залежить від значної кількості факторів, які, змінюючись у часі, площині та просторі, мають ймовірнісний характер зі складними взаємозв'язками. З позицій систем автоматичного управління СТЕ — є нелінійною розімкненою системою с розподіленими параметрами. Традиційні підходи, застосовувані в теорії автоматичного управління, не дозволяють навіть наближено отримати передатні характеристики СТЕ для подальших розрахунків стійкості за напругою.

Стійкість СТЕ є істотним чинником, що впливає на ефективність режимів тягового електропостачання та споживачів. Через недостатню пропускну здатність тягових мереж, застарілі методи їх проектування та експлуатації, відсутність сучасних методів оцінювання стійкості та ефективних засобів її підвищення стійкість системи тягового електропостачання за напругою знижується. В усталеному режимі функціонування реальної СТЕ її параметри постійно змінюються, що пов'язано з такими факторами: зміною навантаження (кількістю ЕРС на міжпідстанційній зоні та зміною їхньої потужності); відхиленнями напруги; температурою нагріву контактних проводів. Таким чином, в усталеному режимі системи завжди є незначні збурення параметрів її режиму, за яких вона має бути стійкою.

Виходячи з визначення коефіцієнта стійкості за напругою K_U , необхідно зазначити, що цей коефіцієнт є величиною, пропорційною величині напруги на струмоприймачі електровоза. Тому крива стійкості буде мати ту ж форму, що й крива напруги. Кількісна оцінка стійкості за напругою СТЕ за виразом (1) виконувалась за таких припущень: СШ — ковзний контакт струмоприймача, $U_{\text{СШ}} = f(t)$, $U_{\text{ном}} = 3,3$ кВ, $U_{\text{кр}} = 2,9$ кВ (для умов швидкісного руху).

В результаті застосування такого підходу в роботі [11] встановлено, що в процесі руху потяга по реальній ділянці мають місце зони відсутності стійкості за напругою. Для уточнюючого розрахунку статичної стійкості вибрано перегін між підстанціями «Ж–В» через наявність затяжного підйому, схема живлення — повна паралельна.

На першому етапі, з використанням експериментальних даних, розраховано викиди напруги, тобто значні відхилення від середньої напруги, на розрахунковій зоні «Ж–В» та статичну стій-

кість. Таким чином, досліджувалась залежність стійкості від викидів напруги на струмоприймачі під час руху електровоза по ділянці. Результати розрахунків показано на рис. 1, 2.

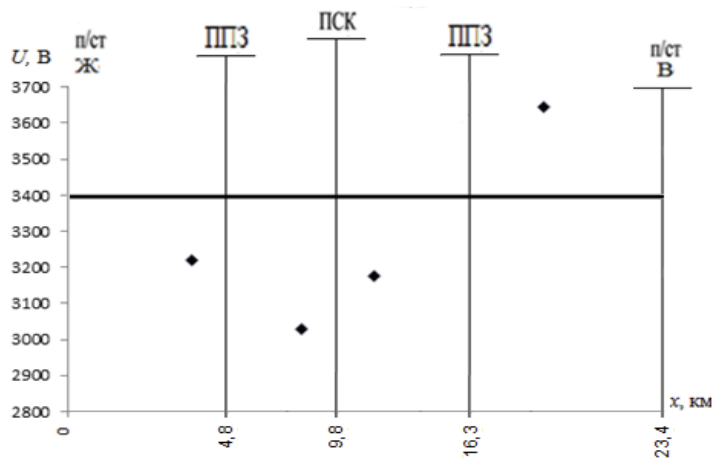


Рис. 1. Середня напруга на міжпідстанційній зоні «Ж-В» та викиди напруги

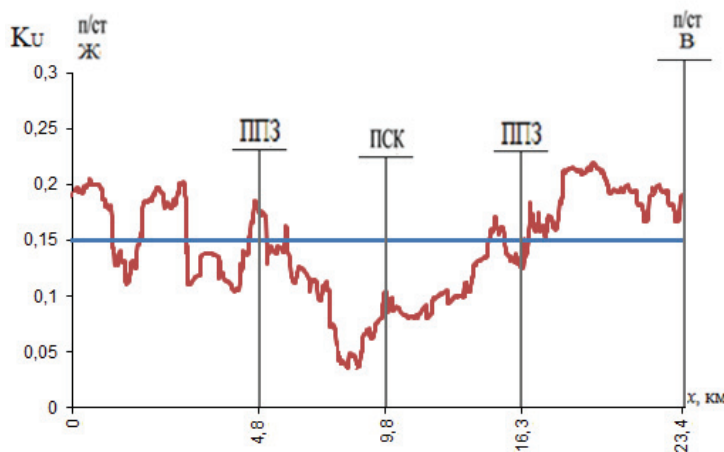


Рис. 2. Статична стійкість за напругою на ділянці «Ж-В»

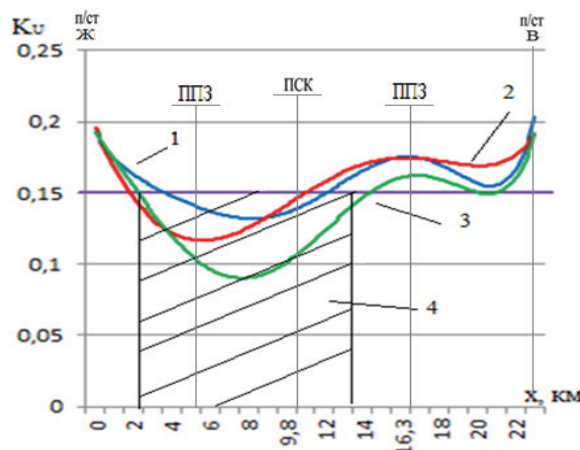


Рис. 3. Статична стійкість при застосуванні різних схем живлення:
1 — паралельна схема; 2 — вузлова схема; 3 — двостороння схема;
4 — зона нестійкості

якості для високошвидкісних потягів.

Можна вказати напрямки підвищення стійкості СТЕ за напругою:

- підвищення напруги на шинах тягових підстанцій;
- підвищення напруги на струмоприймачах електровозів;

З аналізу наведених графіків можна зробити висновок, що статична стійкість не задовольняє умові $K_U < 0,15$ у тих місцях, де напруга на струмоприймачеві була нижчою 3,4 кВ. З цього можна зробити припущення — якщо підвищити напругу у контактній мережі, то тим самим підвищиться і статична стійкість системи тягового електропостачання. При цьому підвищення напруги в тяговій мережі може призвести практично до пропорційного підвищення швидкості руху поїздів, за умови відсутності обмежень, тобто, збільшення пропускної здатності.

Далі оцінювався вплив схеми живлення на стійкість СТЕ за напругою. Для вибраної ділянки розглядалися такі схеми живлення: повна паралельна, вузлова та двостороння [12]. Довжина ділянки 23,4 км, тип контактної підвіски М120+2МФ100+А185. Для кожної зі схем живлення проводився розрахунок рівнів напруги по всій довжині ділянки (враховуючи зрівнювальні струми), з використанням дійсних значень споживаного струму електровозу з експериментальних даних. Отримані графіки K_U статичної стійкості за напругою для різних схем живлення показані на рис. 3.

Аналіз рис. 3 показує, що незалежно від схеми живлення тягової мережі СТЕ має нестійкі зони за напругою, що у разі впровадження швидкісного руху вимагатиме розробки заходів по їх усуненню. Необхідно звернути увагу, що в зоні нестійкості за напругою розташовані пункт паралельного з'єднання і пост секціонування (ПСК), застосування яких сприяє, в тому числі, і поліпшенню режиму напруги в тяговій мережі.

Підсумовуючи результати всіх наведених розрахунків, можна сказати, що існуюча система електропостачання, з використанням будь-якої схеми живлення, не стійка за напругою і потребує модернізації. Тобто, існуюча схемотехніка СТЕ постійного струму не завжди може забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і високої

- зменшення діапазонів зміни напруги в тяговій мережі;
- розробка несиметричних схем підсилення тягової мережі;
- застосування системи розподіленого живлення.

Висновки

Існуючі системи тягового електропостачання, не можуть у повному обсязі забезпечити провізну спроможність залізниць. Особливо гостро ця проблема стосується системи електричної тяги постійного струму 3 кВ на великих транспортних вузлах. Отже, необхідно шукати способи підвищення тягово-енергетичних можливостей експлуатованих систем тягового електропостачання для того, щоб сучасні енергетичні канали систем тягового електропостачання могли повною мірою забезпечувати надійність та безперебійність живлення, стійкість до непередбачуваних впливів та високу енергоефективність.

Дослідження проблеми стійкості за напругою є основою розробки технічних заходів з планування резервів потужності у системі тягового електропостачання постійного струму, направлених на підвищення режимної безпеки у ній як сьогодні, так і в найближчій перспективі. Це дозволить не лише дослідити стійкість за напругою для існуючих режимних умов, а також визначити вплив запланованого розширення полігону швидкісного руху, прогнозованого зростання навантаження та запланувати зміни у структурі системи електропостачання для забезпечення стійкості перспективних режимів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Г. Г. Марквардт, *Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения*. Москва: Транспорт, 1972.
- [2] Р. И. Мирошниченко, *Режимы работы электрифицированных участков*. Москва: Транспорт, 1982.
- [3] Б. А. Аржанников, и Ю. В. Ткачев, *Методика получения зависимости потери эл. эн. в тяг. сети от среднего напряжения на токоприемнике электровоза при заданном времени хода поезда по участку*. Свердловск: Уральский электромех. ин-т инж. ж.д. трансп, 1986.
- [4] *Правила технічної експлуатації залізниць*. Київ, Україна: 1997.
- [5] С. И. Осипов, *Рациональные режимы вождения поездов и испытание локомотивов*. Москва: Транспорт, 1984.
- [6] Б. А. Аржанников, *Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока*. Екатеринбург, Россия: УРГУПС, 2010.
- [7] Д. Г. Дерев'яно, «Особенности оценки запаса стійкості локальних систем з різнорідними джерелами генерації», *Енергетика економіка, технології, екологія. Спецвипуск, Матеріали аспірантських читань пам'яті А. В. Праховника*, с. 15-19, 2013.
- [8] О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко, та С. В. Зорін, «Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою», *Технічна електродинаміка*, № 3 с. 59-66, 2010.
- [9] *Стійкість енергосистем. Керівні вказівки*. СОУ-Н МЕВ 40.1 – 00100227 – 68: 2012. Київ, Україна: ГРІФРЕ: Міненерговугілля України, 2012, 35 с.
- [10] В. М. Авраменко, П. О. Черненко, та Н. Т. Юнєєва, «Оцінювання поточного запаса статичної стійкості енергосистеми з використанням оперативного прогнозу вузлових навантажень», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 90-93, 2013.
- [11] В. Г. Сыченко, А. А. Матусевич, А. В. Рогоза, М. Е. Павличенко, И. Л. Васильев, и Н. Н. Пулин «Повышение энергетической эффективности в эволюционирующих системах электроснабжения», *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, № 27 (1249), с. 182-186, 2017.
- [12] Э. В. Тер-Оганов, и А. А. Пышкин, *Электроснабжение железных дорог*. Екатеринбург, Россия : УРГУПС, 2014.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018

Сиченко Віктор Григорович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання», e-mail: elpostz@i.ua ;

Рогоза Анастасія Володимирівна — студентка факультету управління енергетичними процесами.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, Дніпро;

Пулін Микола Миколайович — начальник служби електропостачання.

Регіональна філія «Львівська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця»

V. H. Sychenko¹

A. V. Rogosa¹

M. M. Pulin²

Quantitative Assessment of the Durability of the Continuous Supply System

¹Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan;

²Lviv Railroad PJSC “Ukrzaliznytsia”

The development and implementation of high-speed traffic requires a change in approaches to the modernization of the traction power supply system since the applied DC traction system cannot always provide electricity with required power and quality.

The resulting limitations include reducing the voltage on the pantograph of an electric locomotive below the permissible value for normal operation and heating the wires of the contact line, which contributes to the loss of their mechanical strength. The process of power consumption in the traction line occurs under the influence of different disturbances: changes in the operating modes of the electric rolling stock depending on the features of the train schedule, the track profile and available limitations, short-time detachment of pantograph and various transient processes; therefore, mode of voltage under the influence of these disturbances has a non-stationary oscillatory character with sudden changes in voltage that lead to a decrease in the stability of the interacting systems - power supply and electric rolling stock. In the presence of such hard-to-control factors, the stability limit may occur at different values of the influencing parameters. To estimate the stability margin in load nodes of power systems, reserve voltage factors are used, since the voltage on the bus bars is the main monitored parameter for power distribution substations. This approach on the basis of practical stress stability criteria has been applied in this work. The results of the calculation of the stress stability criteria for the functioning of the traction power supply system on the real section of the electrified railway allowed establishing static voltage instability in the individual sections of the traction line. It allowed making a conclusion that the existing power schemes do not allow to maintain the necessary voltage mode in the traction line and provide the necessary voltage stability for high-speed traffic that leads to the transition to new circuit solutions for traction power supply systems.

Keywords: high-speed movement, traction power system, voltage regime, gain point, voltage stability.

Sychenko Victor H. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Intelligent Electrical Systems, e-mail: elpostz@i.ua ;

Rogoza Anastasia V. — Student of the Department of Management of Energy Processes;

Pulin Mykola M. — Chief of the Power Supply

В. Г. Сыченко¹
А. В. Рогоза¹
Н. Н. Пулин²

Количественная оценка устойчивости системы тягового электроснабжения постоянного тока по напряжению

¹Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. Ак. В. Лазаряна;

²Региональный филиал «Львовская железная дорога» ПАО «Укрзалізниця»

Развитие и внедрение скоростного движения требует изменения подходов к модернизации системы тягового электроснабжения, поскольку применяемая система тягового электроснабжения постоянного тока не всегда может обеспечить передачу электроэнергии необходимой мощности и качества. К возникающим ограничениям относятся снижение напряжения на токоприемниках электровоза ниже допустимого для нормальной эксплуатации значения и нагрев проводов контактной сети, что способствует потере их механической прочности. Процесс электропотребления в тяговой сети происходит под влиянием разнородных возмущений: изменения режимов работы электроподвижного состава в зависимости от особенностей графика движения поездов, профиля пути и имеющихся ограничений, кратковременных отрывов токоприемников и различного рода переходных процессов, поэтому режим напряжения в тяговой сети под влиянием этих возмущений имеет нестационарный колебательный характер с резкими изменениями напряжения, что может приводить к снижению устойчивости взаимодействующей системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава. При наличии таких трудно контролируемых факторов, предел устойчивости может наступать при различных значениях влияющих параметров. Для оценки запаса устойчивости в узлах нагрузки энергосистем используются коэффициенты запаса по напряжению, так как напряжение на шинах является основным контролируемым параметром для питающих распределительных подстанций. Именно такой подход, с применением практических критериев устойчивости по напряжению, и был применен в данной работе. Результаты расчетов критериев устойчивости по напряжению при функционировании системы тягового электроснабжения на реальном участке электрифицированной железной дороги позволили установить статическую неустойчивость по напряжению в отдельных сечениях тяговой сети. Отсюда следует, что существующие схемы питания не позволяют выдерживать необходимый режим напряжения в тяговой сети и обеспечивать необходимую устойчивость по напряжению при скоростном движении, что обуславливает необходимость перехода к новым схемным решениям систем тягового электроснабжения.

Ключевые слова: скоростное движение, система тягового электроснабжения, режим напряжения, пункт усиления, устойчивость по напряжению.

Сиченко Виктор Григорьевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Интеллектуальные системы электроснабжения», e-mail: elpostz@i.ua ;

Рогоза Анастасия Владимировна — студентка факультета управления энергетическими процессами;

Пулин Николай Николаевич — начальник службы электроснабжения