

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.423.3:[621.313.2:621.316.73]

А. М. АФАНАСОВ^{1*}, С. В. АРПУЛЬ^{2*}, Д. С. БІЛУХІН^{3*}, А. Я. ШЕМЕТ^{4*},
В. С. ВАСИЛЬЄВ^{5*}, О. О. ГОЛОЛОВОВА⁶, Р. В. МАРКУЛЬ⁷

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{2*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{3*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта comandor04@gmail.com, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{4*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта shemetandriy2310@gmail.com, ORCID 0000-0001-6914-4182

^{5*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

⁶Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

⁷Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта guarangamr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7630-8963

Використання глибокого послаблення збудження для тягових двигунів магістральних електровозів

Мета. Ураховуючи необхідність поліпшення експлуатаційних властивостей сучасного магістрального рухомого складу, автори передбачають проаналізувати можливості використання більш глибокого регулювання ослаблення збудження. **Методика.** Виконано аналіз роботи тиристорно-імпульсного перетворювача електропоїзда EP200. Установлено, що в режимі розгону на граничній тяговій характеристиці необхідно розглядати дві зони: зону сталого значення сили тяги й зону сталої потужності. Запропоновано методику визначення мінімального значення коефіцієнта ослаблення збудження для різних типів тягових двигунів постійного й пульсуючого струму. Для аналізу використано методи теоретичного дослідження й аналітичного розрахунку електричних кіл, теоретичних основ електричної тяги, математичного моделювання електричних та енергетичних процесів. **Результати.** Проведений комплекс теоретичних досліджень і розрахунків дозволяє підтвердити технічну можливість використання глибокого послаблення збудження для регулювання швидкості й отримання додаткових безреостатних позицій для рухомого складу з тяговими двигунами постійного й пульсуючого струму. Визначено величину мінімального коефіцієнта послаблення збудження для різних типів тягових двигунів. **Наукова новизна.** Удосконалено методику визначення мінімального значення коефіцієнта послаблення збудження для тягових двигунів магістральних електровозів у частині використання більш глибокого регулювання магнітного потоку, заміни використання даних експериментальних досліджень теоретичними дослідженнями, суть яких полягає у формуванні необхідного виду граничної тягової характеристики за рахунок зменшення мінімально допустимого значення коефіцієнта збудження, що дозволить зменшити витрати електричної енергії. Отримали подальший розвиток дослідження з визначення кількісних показників витрати електричної енергії для аналізу резервів енергозбереження на магістральному транспорті. **Практична значимість.** Результати теоретичних досліджень можуть стати основою для модернізації магістральних електровозів постійного й пульсуючого струму із системами глибокого регулювання послаблення збудження. Проведені дослідження дозволять розробити рекомендації щодо проектування систем регулювання магнітного потоку тягових двигунів із поліпшеними техніко-економічними характеристиками, які здатні підвищити ефективність перевізного процесу на магістральному транспорті.

Ключові слова: коефіцієнт послаблення збудження; магнітний потік; тяговий двигун; швидкість; напруга; струм; потужність; тягова характеристика; електровоз; регулятор

Вступ

Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року [8] одним з основних напрямів розвитку залізничного транспорту передбачає оновлення тягового рухомого складу, у тому числі високошвидкісного. Водночас капітальний ремонт із подовженням терміну служби дозволяє модернізувати рухомий склад, збільшуючи термін експлуатації того ЕРС, який відпрацював нормативний ресурс на 10–15 років. Застосування напівпровідникових приладів у силових схемах нового й модернізованого електрорухомого складу дозволить підвищити надійність тягового електропривода, розширити діапазон регулювання швидкості, знизити втрати потужності [3]. До того ж сучасна елементна база силової електроніки дозволяє замінити індуктивні шунти, які використовують для ослаблення збудження тягових двигунів, на «безіндуктивні», що мають поліпшені вагогабаритні показники.

У наш час на вітчизняному електрорухомому складі найбільшого поширення набули тягові двигуни постійного струму послідовного збудження, що мають хороші регульовальні властивості. Під час зрушування, руху електровоза або електропоїзда по перегону й електричного гальмування виникає необхідність змінювати швидкість, силу тяги або гальмування згідно із законом, що відрізняється від характеристик тягового двигуна за номінальної напруги й величини магнітного потоку. Зміна швидкості й сили тяги електрорухомого складу в необхідних межах може бути здійснена регулюванням магнітного потоку й величини напруги на тягових двигунах [5, 6].

Збільшення числа ходових ступенів швидкості на всіх сучасних електровозах і моторних вагонах регулюють збудженням тягових двигунів постійного струму. Для цього застосовують шунтування обмоток збудження опором або імпульсним регулюванням збудження. Вибір числа ступенів ослаблення збудження визначають допустимими коливаннями струму тягового двигуна й тягового зусилля під час переходу з однієї позиції на іншу. Збільшення глибини регулювання й глибини ослаблення збудження підвищує гнучкість управління тягою, поліпшує динаміку розгону, зменшує витрату електроенергії.

Мета

У роботі передбачено розглянути можливість зменшення мінімального значення коефіцієнта ослаблення збудження для поліпшення технічних характеристик електрорухомого складу, збільшення кількості економічних позицій регулювання швидкості. Щоб досягти поставленої мети, потрібно виконати аналіз системи регулювання збудження тягових двигунів електрорухомого складу, запропонувати методику розрахунку значення мінімального коефіцієнта ослаблення збудження для можливості формування тягової характеристики постійної потужності.

Методика

Для аналізу впливу характеристик тягових двигунів електрорухомого складу на можливість формування тягової характеристики постійної потужності, а також визначення мінімально допустимого значення коефіцієнта збудження використано комплексний підхід, який включає попередній аналіз інформації, подальші розрахунки за допомогою відомих методів теорії електричних кіл, теоретичних основ електричної тяги, електричної тяги, аналітичного та чисельного розв'язання систем лінійних і нелінійних інтегро-диференціальних та алгебраїчних рівнянь, наявні методи математичного та імітаційного моделювання, обробки експериментальних даних.

Під час шунтування обмоток збудження тільки активним опором різке підвищення напруги мережі може призвести до істотного зменшення коефіцієнта ослаблення збудження в перехідному режимі. Оскільки наростаючий струм у колі тягових двигунів проходить переважно через шунт, наростанню струму в колі обмоток збудження перешкоджає їх великий індуктивний опір. Збільшення струму якоря за відносно малої зміни струму збудження погіршує умови комутації тягових двигунів. Це особливо небезпечно під час відновлення повної напруги після його зняття (наприклад, у результаті відриву струмоприймача від контактного дроту й подальшого відновлення контакту), що вимагає використання в колі тягових двигунів індуктивного шунта.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Розгалуження струму якоря у відношенні β й $1-\beta$ між обмоткою збудження й шунтувальним колом під час перехідних процесів забезпечується певним співвідношенням індуктивностей цих кіл. Для нестационарного режиму рівняння

$$I_3 \cdot R_3 = I_{ш} \cdot R_{ш}$$

набуває вигляду:

$$i_3 \cdot R_3 + L_3 \cdot \frac{di_3}{dt} = i_{ш} \cdot R_{ш} + L_{ш} \cdot \frac{di_{ш}}{dt}$$

де L_3 , $L_{ш}$ – індуктивність обмотки збудження двигуна й індуктивного шунта відповідно, Гн; $R_{ш}$ – сумарний опір шунтувального кола, Ом.

Згідно з поставленою вище умовою потрібно, щоб під час перехідного процесу зберігалася рівність:

$$i_3 = i_{ш};$$

$$i_{ш} = (1-\beta) \cdot i_я,$$

звідки

$$\begin{aligned} \beta \cdot i_я \cdot R_3 + L_3 \cdot \beta \cdot \frac{di_я}{dt} &= \\ &= (1-\beta) \cdot i_я \cdot R_{ш} + L_{ш} \cdot (1-\beta) \frac{di_я}{dt}; \end{aligned}$$

$$\beta \cdot i_я \cdot R_3 = (1-\beta) \cdot i_я \cdot R_{ш},$$

звідки

$$\beta \cdot L_3 = (1-\beta) \cdot L_{ш};$$

$$L_{ш} = \frac{\beta}{1-\beta} \cdot L_3.$$

Для машин із насиченою магнітною системою індуктивність обмотки збудження становитиме:

$$L_3 = a \cdot \omega \cdot \frac{d\Phi}{dI_3} \cdot 10^{-8},$$

де a – коефіцієнт, менший за одиницю, що враховує розмагнічувальний вплив вихрових струмів, наведених у масивному остові двигуна; ω – число витків обмотки збудження.

Щоб зберегти співвідношення для $L_{ш}$ за будь-якого значення струму збудження I_3 , індуктивність шунта $L_{ш}$ і його потік $\Phi_{ш}$ повинні змінюватися пропорційно потоку двигуна:

$$\Phi_{ш} = \frac{a \cdot \omega}{\omega_{ш}} \cdot \Phi,$$

де $\omega_{ш}$ – число витків обмотки індуктивного шунта.

У цьому випадку під час відновлення напруги велика частина струму якоря пройде через обмотку збудження, двигун перейде в режим повного збудження, і режим ослаблення збудження поступово відновиться. Унаслідок дії вихрових струмів практично неможливо уникнути поштовху струму в якорі за нестационарних режимів.

Імпульсне регулювання струму збудження здійснюють зміною відносної тривалості імпульсів напруги, які прикладають до обмотки збудження. Відносна тривалість імпульсу напруги залежно від схеми під'єднання імпульсного регулятора до обмотки збудження дорівнює коефіцієнту заповнення β за послідовного ввімкнення імпульсного регулятора, або $1-\beta$ у схемі паралельного під'єднання імпульсного регулятора.

Амплітуда імпульсу напруги збудження U_3 , яку прикладають до обмотки, дорівнює падінню напруги на резисторі $R_{ш}$:

$$U_3 = R_{ш} \cdot (I_я - I_3).$$

Середня напруга, яку прикладають до обмотки збудження:

$$U_{з.сп.посл} = R_{ш} \cdot \lambda \cdot (I_я - I_3);$$

$$U_{з.сп.пар} = R_{ш} \cdot (1-\lambda) \cdot (I_я - I_3).$$

Значенням $\lambda=0$ і $\lambda=1$ відповідають закритий і відкритий стани тиристора, коли ключовий елемент перебуває в одному з двох станів, який визначають положенням контролера машиніста (ослаблення збудження ввімкнене–вимкнене).

Тоді середнє значення струму збудження

$$I_3 = \frac{U_{з.сп.}}{R_3}.$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Незалежно від схеми під'єднання імпульсного регулятора, струм збудження пульсує на рівні середнього значення.

Середню напругу збудження можна взяти рівною падінню напруги на її еквівалентному опорі шунтувального кола:

$$R_{\text{екв.посл}} = R_{\text{ш}} \cdot \lambda;$$

$$R_{\text{екв.пар}} = R_{\text{ш}} \cdot (1 - \lambda).$$

Коефіцієнт ослаблення збудження:

$$\beta = \frac{I_3}{I_я} = \frac{R_{\text{екв}}}{R_{\text{екв}} + R_3}.$$

Підставляючи значення еквівалентного опору, отримаємо:

$$\beta_{\text{посл}} = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{R_3}{R_{\text{ш}}}};$$

$$\beta_{\text{пар}} = \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda + \frac{R_3}{R_{\text{ш}}}}.$$

З отриманих виразів випливає, що коефіцієнт ослаблення збудження нелінійно залежить від коефіцієнта заповнення, характер залежності визначають схема під'єднання імпульсного регулятора до обмотки збудження та співвідношення опорів обмотки збудження й увімкненого паралельно їй резистора. У схемі з послідовним під'єднанням імпульсного регулятора коефіцієнт ослаблення збудження зростає зі збільшенням коефіцієнта заповнення, а в схемі з паралельним під'єднанням імпульсного регулятора зменшується.

Результати

Відома значна кількість технічних пропозицій, спрямованих на формування необхідних тягових властивостей локомотивів за рахунок регулювання жорсткості тягових характеристиками шляхом зміни магнітного потоку тягових двигунів [1, 2, 9], що призводить до зниження втрат потужності.

Оптимізація витрат електричної енергії під час руху поїздів і втрат електроенергії в контак-

тній мережі, важлива не тільки для тягового рухомого складу, але й для системи тягового електропостачання [7, 10].

У наш час принципи регулювання магнітного потоку широко використовують не тільки в електроприводах постійного струму, але і в системах векторного керування асинхронними двигунами сучасного електротранспорту [11, 12].

Плавне регулювання ступеня ослаблення поля тягових електродвигунів постійного струму використовували на електропоїзді ЕР200, експлуатувати який припинили у 2009 році [4].

Широтно-імпульсне регулювання коефіцієнта ослаблення поля на цьому електропоїзді здійснювали за допомогою тиристорно-імпульсного перетворювача. За допомогою того ж перетворювача здійснювали і плавне міжступеневе регулювання напруги на тягових електродвигунах. Годинна потужність колекторного тягового двигуна постійного струму послідовного збудження 1ДТ–001 складає 240 кВт. Годинний струм тягового двигуна дорівнює 360 А, при цьому максимальний пусковий струм – 400 А.

Силова електрична схема електропоїзда забезпечує два можливі з'єднання тягових двигунів пари моторних вагонів: послідовне «С» та паралельне «СП». При цьому напруга на послідовно-паралельному з'єднанні дорівнює номінальній – 750 В.

Завдяки плавному регулюванню ступеня ослаблення поля тягових двигунів у певних діапазонах зміни швидкостей на обох з'єднаннях («С» та «СП») формується тягова характеристика постійної потужності. Причому на з'єднанні «СП» забезпечується сталість потужності за максимального (пускового) струму 400 А аж до максимального значення швидкості електропоїзда 200 км/год.

Аналіз тягових характеристик електропоїзда показує, що коефіцієнт використання потужності $k_{\text{и}}$ тягового двигуна 1ДТ–001 дорівнює одиниці.

$$k_{\text{и}} = \frac{P_{\text{vmax}}}{P_{\text{п}}} = 1.$$

де P_{vmax} – потужність за максимальної швидкості; $P_{\text{п}}$ – розрахункова потужність для заданого значення пускового струму.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Слід звернути особливу увагу на те, що $k_{\text{н}} = 1$ за всіх значень пускового струму $I_{\text{пуск}}$, і навіть за максимального значення, що дорівнює 400 А. Це досягається за рахунок використання дуже глибокого ослаблення поля до значення:

$$\beta_{\text{min}} = 0,2.$$

Таке глибоке ослаблення поля тягового двигуна без компенсаційної обмотки є надмірним. Однак і під час стендових випробувань, і під час експлуатації електропоїзда була відзначена досить висока потенційна стійкість тягового двигуна.

Середня максимальна напруга тягового двигуна 1ДТ–001 становить:

$$u_{\text{к.ср}} = \frac{2pU_{\text{н}}}{K} = 10,2 \text{ В},$$

де $p = 2$ – кількість пар полюсів; $U_{\text{н}} = 750 \text{ В}$ – номінальна напруга; $K = 294$ – кількість колекторних пластин.

Стендові випробування показали, що двигун має досить високу потенційну стійкість. Максимальна міжلامельна напруга в разі ослаблення поля до $\beta = 0,28$ становить 23,5 В, а градієнт потенціалу – 62 В/см. Це дозволило застосувати ослаблення поля до значення $\beta = 0,2$.

Найбільш вагомим фактором, який визначив можливість використання глибокого ослаблення поля на електропоїзді EP200, став тиристорно-імпульсний регулятор ослаблення поля і, природно, відносно низьке значення середньої міжلامельної напруги $u_{\text{к}} = 10,2 \text{ В}$, яка обумовлена досить низькою номінальною напругою $U_{\text{н}} = 750 \text{ В}$.

Розглянемо режим розгону електрорухомого складу за граничною тяговою характеристикою, яка наведена на рис. 1.

Ця характеристика має дві зони. Зона I характеризується сталістю пускового значення сили тяги та відповідає відрізку зміни швидкості від нуля до розрахункового значення $v_{\text{р}}$:

$$F = F_{\text{р}} = \text{const}$$

де $F_{\text{р}}$ – розрахункове значення сили тяги.

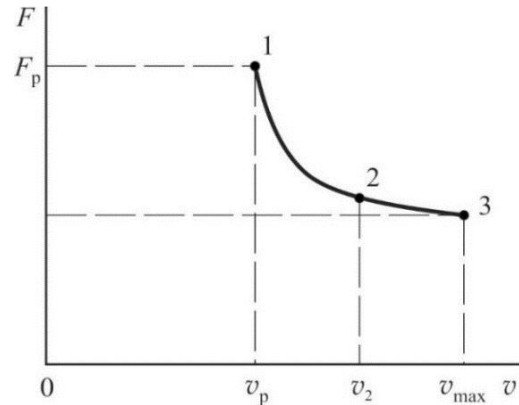


Рис. 1. Гранична тягова характеристика електрорухомого складу

Fig. 1. Limit traction characteristics of electric rolling stock

У зоні II, яка відповідає відрізку зміни швидкості від розрахункового значення $v_{\text{р}}$ до максимальної швидкості v_{max} , шляхом плавного регулювання коефіцієнта збудження тягового електродвигуна забезпечується умова сталості потужності:

$$P = \text{const}.$$

Спрощена принципова електрична схема електропривода наведена на рис. 2.

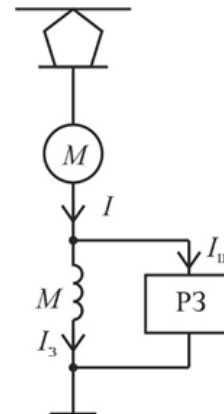


Рис. 2. Спрощена принципова електрична схема електропривода

Fig. 2. Simplified electrical schematic diagram of the electric drive

Обмотка збудження тягового двигуна М зашунтована регулятором збудження РЗ, за допомогою якого здійснюється імпульсне регулювання коефіцієнта збудження:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\beta = \frac{I_3}{I},$$

де I_3 – струм збудження тягового електродвигуна; I – струм якоря тягового електродвигуна.

Стабілізація сили тяги в зоні I тягової характеристики (рис. 1) може бути забезпечена стабілізацією пускового струму I шляхом планового підвищення напруги на електродвигуні тягового з використанням системи автоматичного регулювання, спрощена функціональна схема якої подана на рис. 3.

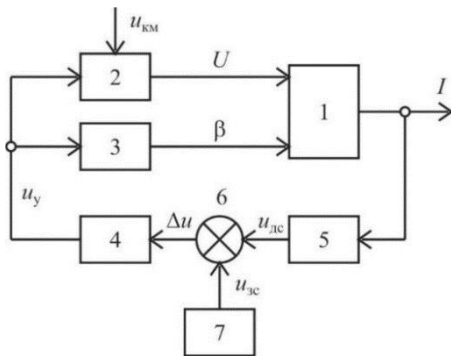


Рис. 3. Спрощена функціональна схема системи автоматичного регулювання

Fig. 3. Simplified functional diagram of the automatic control system

Умова стабілізації сили тяги може бути представлена у вигляді:

$$I = \text{const.}$$

Напруга U на тяговому двигуні I регулюється за допомогою регулятора 2, який під'єднаний до контактної мережі з напругою $U_{\text{км}}$. Напруга на виході регулятора пропорційна керувальній напрузі u_y на виході автоматичного регулятора 4, який забезпечує заданий закон регулювання. Реальне значення струму тягового електродвигуна (якоря) контролюється датчиком струму 5, сигнал із виходу якого u_{dc} надходить на один із входів ланки порівняння 6. На інший вхід ланки порівняння надходить сигнал u_{zc} від задатчика струму 7.

Така функціональна схема може забезпечити стабілізацію струму якоря як у діапазоні зміни швидкості від нуля до v_p (зона I), так і в діапазоні від v_p до v_{max} (зона II).

У зоні II ($v \in [v_p; v_{\text{max}}]$) стабілізація струму I забезпечується шляхом регулювання коефіцієнта збудження β регулятором ослаблення поля 3 з використанням того ж принципу автоматичного керування з відхиленням (негативний зворотний зв'язок).

На рис. 4 наведено характеристику зміни потужності тягового двигуна, що відповідає характеристиці $F(v)$, наведеній на рис. 1.

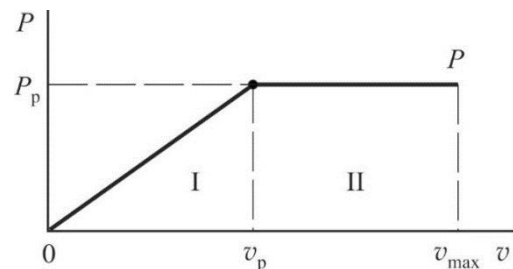


Рис. 4. Характеристика зміни потужності тягового двигуна

Fig. 4. Characteristics of traction engine power change

Для забезпечення сталості потужності в зоні II достатньо виконати умову:

$$\begin{cases} U = \text{const.} \\ I = \text{const.} \end{cases} \quad (1)$$

Розглянемо, яким чином має змінюватися коефіцієнт збудження β для забезпечення умови (1) у зоні II.

На рис. 5 умовно наведено електротягову характеристику $v = f(I)$, що відповідає нормальному ослабленню поля:

$$\beta = \beta_{\text{нп}}. \quad (2)$$

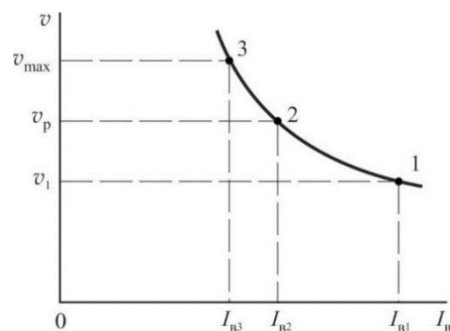


Рис. 5. Електротягова характеристика

Fig. 5. Electric traction characteristics

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Розглянемо задачу визначення залежності $\beta = f(v)$, яка забезпечуватиме характеристику $F = f(v)$, наведену на рис. 1. Очевидно, що в зоні I ($v \leq v_p$) ця залежність матиме вигляд (2). Для зони II значення коефіцієнта збудження, що відповідає заданому значенню швидкості та забезпечує умову (1), можна визначити з виразу:

$$\beta = \frac{\beta_{\text{нп}} I_1}{I_p}, \quad (3)$$

де I_1 – значення струму якоря, яке відповідає заданій швидкості v_1 на електромеханічній характеристиці тягового електродвигуна для умови (2).

Наприклад, на рис. 5 наведено методику визначення характеристики $\beta = f(v)$ на прикладі трьох характерних точок, що відповідають струмам I_1, I_2, I_p (струми 1, 2, 3).

На рис. 6 наведено характер залежності $\beta = f(v)$, що забезпечує тягову характеристику, наведену на рис. 1. Можливість формування тягової характеристики постійної потужності визначається та обмежується мінімально допустимим значенням коефіцієнта збудження $\beta_{\text{мін}}$. Тобто на всьому відрізку зміни швидкості в зоні II ($v \in [v_p; v_{\text{max}}]$) має виконуватися умова

$$\beta \geq \beta_{\text{мін}}. \quad (4)$$

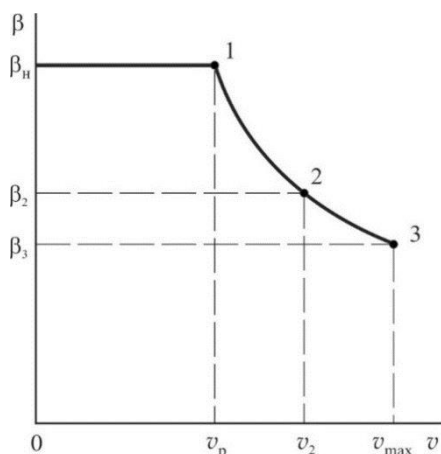


Рис. 6. Характер залежності $\beta = f(v)$

Fig. 6. The nature of dependence $\beta = f(v)$

У табл. 1 наведено значення коефіцієнтів збудження для нормального поля $\beta_{\text{нп}}$, для швидкості v_{max} за умовою (1) $\beta_{v_{\text{max}}}$ та мінімально допустиме значення $\beta_{\text{мін}}$, узяті для ступінчастого регулювання поля (паспортні дані).

Таблиця 1

Коефіцієнти збудження за ступінчастого регулювання

Table 1

Excitation coefficients during the step control

Тип ТЕД	$\beta_{\text{нп}}$	$\beta_{v_{\text{max}}}$	$\beta_{\text{мін}}$
ДТК–820	0,98	0,27	0,48
ДТК–800А	1	0,27	0,43
НБ418К	0,98		

Із даних табл. 1 видно, що умова (4) не виконується для жодного з аналізованих тягових двигунів.

У табл. 2 наведено основні параметри електровозів 2ЕЛ5, 2ЕЛ4 та відповідних тягових двигунів ДТК–820 та ДТК–800А.

У табл. 3 і 4 наведені розраховані для тягових двигунів ДТК–820 і ДТК–800А залежності коефіцієнта збудження від швидкості v , що забезпечують граничну тягову характеристику з постійною потужністю в зоні II регулювання. Залежність $\beta(v)$ для тягового двигуна ДТК–800А розрахована для діапазону зміни швидкості від 51,6 (годинний режим) до 110 км/год, при цьому слід зазначити, що максимальна конструкційна швидкість електровоза 2ЕЛ4, на якому використовують цей тип тягового двигуна, дорівнює 120 км/год. Така сама залежність $\beta(v)$ для тягового двигуна ДТК–820 розрахована для діапазону зміни швидкості від 49,9 (годинний режим) до 110 км/год (максимальна конструкційна швидкість електровоза 2ЕЛ5).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таблиця 2

Основні параметри тягових двигунів електровозів 2ЕЛ5 та 2ЕЛ4

Table 2

Main parameters of traction motors of 2EL5 and 2EL4 electric locomotives

Параметр	2ЕЛ5 (ДТК–820)	2ЕЛ4 (ДТК–800А)
I_{∞} , А	810	525
v_{∞} , км/год	51	51,6
P_{∞} , кВт	765	740
$I_{\text{год}}$, А	870	570
$v_{\text{год}}$, км/год	49,9	50
$P_{\text{год}}$, кВт	820	800
v_{max} , км/год	110	120
β_{min}	0,48	0,43
$\beta_{\text{нп}}$	0,98	1

Таблиця 3

Залежність $\beta(v)$ для тягового двигуна ДТК–820

Table 3

Dependence $\beta(v)$ for DTK-820 traction engine

v , км/год	49,9	60	70	90	110
β	0,98	0,67	0,52	0,36	0,27

Таблиця 4

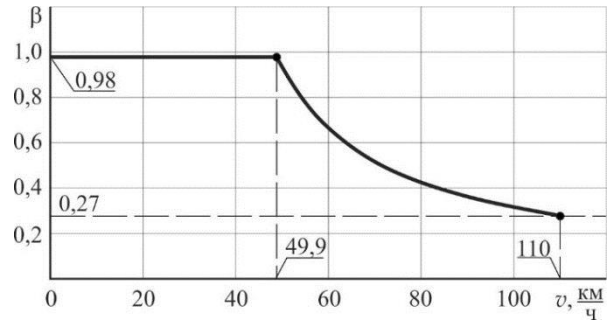
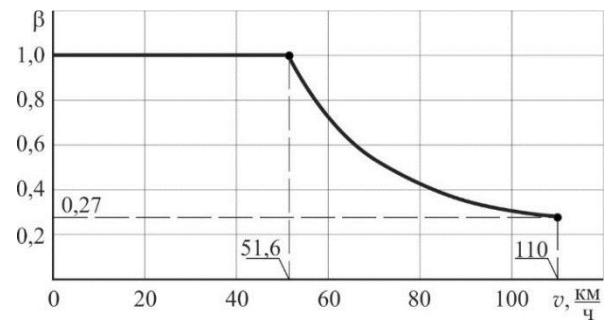
Залежність $\beta(v)$

для тягового двигуна ДТК–800А

Table 4

Dependence $\beta(v)$ for DTK-800A traction engine

v , км/год	51,6	60	70	90	110
β	1	0,72	0,53	0,34	0,27

Рис. 7. Залежність $\beta(v)$ для тягового двигуна ДТК–820Fig. 7. Dependence of $\beta(v)$ for DTK-820 traction engineРис. 8. Залежність $\beta(v)$ для тягового двигуна ДТК–800АFig. 8. Dependence of $\beta(v)$ for DTK-800A traction engine

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено теоретичні підходи щодо більш точного визначення величини мінімального значення коефіцієнта ослаблення збудження тягових двигунів послідовного збудження постійного й пульсуючого струму.

Уперше запропоновано й обґрунтовано можливість використання меншого значення коефіцієнта ослаблення збудження, ніж за паспортними даними тягових двигунів. Подальший розвиток отримали методи розрахунку залежності коефіцієнта збудження від швидкості, що забезпечують граничну тягову характеристику з постійною потужністю в зоні регулювання II.

Обґрунтовано використання глибокого ослаблення збудження тягових двигунів послідовного збудження магістральних електровозів, що

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

дозволить отримати додаткові економічні позиції. Розроблена методика розрахунку дає можливість врахувати випадковий характер зміни напруги на двигуні в режимі розгону. Запропонований метод визначення мінімального коефіцієнта ослаблення збудження дозволяє проводити подібні розрахунки для будь-якого тягового двигуна постійного та пульсувального струму.

Висновки

1. Проведено аналіз режимів потужності під час формування граничної тягової характеристики в тягових мережах. Установлено, що в системі тягового забезпечення постійного струму із застосуванням централізованого живлення необхідно розглядати дві зони на граничній тяговій характеристиці. Можливість формування тягової характеристики постійної потужності визначається та обмежується мінімально допустимим значенням коефіцієнта збудження.

2. Здійснено оцінку мінімального ступеня ослаблення збудження для тягових двигунів постійного й пульсувального струму, розраховано залежності коефіцієнта збудження від швидкості v , що забезпечують граничну тягову характеристику з постійною потужністю в зоні регулювання II. Установлено, що в діапазоні зміни від швидкості годинного режиму до максимальної конструкційної швидкості електровозів 2ЕЛ4 і 2ЕЛ5 можливе використання мінімального ступеня ослаблення збудження 0,27 замість 0,43 і 0,48 відповідно.

3. Упровадження плавного регулювання збудження тягових двигунів на наявному тяговому рухомому складі можливе з мінімальними капітальними затратами на модернізацію.

4. Необхідно провести додаткові теоретичні та експериментальні дослідження потенційної стійкості тягових електродвигунів у режимах глибокого ослаблення збудження з використанням імпульсних перетворювачів на електрорухомому складі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Друбецкий А. Е. Синтез систем взаимного нагружения тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока. *Електрифікація транспорту*. 2017. № 13. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i13.117823>
2. Боднар Б. С., Капіца М. І. Афанасов А. М., Кислий Д. Н. Визначення енергозаощаджуючих режимів розгону поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. Вип. 5 (59). С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
3. Гетьман Г. К., Марікуца С. Л. Вибір раціональних параметрів номінального режиму електровозів. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. Вип. 1 (67). С. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92615>
4. Гуткин Л. В., Дымант Ю. Н., Иванов И. А. *Электротяг ЭР200*. Москва : Транспорт, 1981. 192 с.
5. Друбецкий А. Ю. Апроксимация универсальной магнитной характеристики для моделирования тяговых электрических машин. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. Вип. 1 (67). С. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/94031>
6. Друбецкий А. Ю. Розрахунок магнітних характеристик тягового електродвигуна за допомогою вдосконаленої універсальної магнітної характеристики. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. Вип. 3 (69). С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104559>
7. Косарев С. М. Математична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму. *Електрифікація транспорту*. 2017. № 14. С. 15–27.
8. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>
9. Gavrilovic I. B. A mechatronic approach for the detection of wheel slip/slide and antislip control of locomotive with AC traction motors. *American journal of mechanics and applications*. 2017. Vol. 5. Iss. 6. P. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11>
10. Hubskey P., Kuznetsov V., Drubetskyi A., Afanasov A., Pulin M. (2018). Studying of the power modes in the traction line for ensuring the high-speed traffic. *Електрифікація транспорту*. 2018. Т. 15, № 1 (43). P. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.146665>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

11. Sahoo S. K., Bhattacharya T. Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31. Iss. 6. P. 4429–4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398>
12. Zarri L., Mengoni M., Tani A., Serra G., Casadei D., Ojo J. O. Control Schemes for Field Weakening of Induction Machines. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (Wemgcd)*. 2015. Vol 1. P. 146–155. DOI: <https://doi.org/10.1109/wemgcd.2015.7194523>

A. M. AFANASOV^{1*}, S. V. ARPUL^{2*}, D. S. BILUKHIN^{3*}, A. Y. SHEMET^{4*},
V. Y. VASYLIEV^{5*}, O. O. HOLOLOBOVA⁶, R. V. MARKUL⁷

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{2*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{3*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail comandor04@gmail.com, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{4*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail shemetandriy2310@gmail.com, ORCID 0000-0001-6914-4182

^{5*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

⁶Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

⁷Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail guarangamr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7630-8963

Deep Attenuation Use for Traction Motors of Mainline Electric Locomotives

Purpose. Given the need to improve the performance of modern mainline rolling stock, the authors analyze the possibility of using deeper regulation of attenuation. **Methodology.** The analysis of the operation of the thyristor-pulse converter of ER200 electric train is performed. It is established that in the acceleration mode at the limit traction characteristic it is necessary to consider two zones: the zone of constant value of traction force and the zone of constant power. A method for determining the minimum value of the attenuation coefficient for different types of DC and PC traction motors was proposed. The methods of theoretical research and analytical calculation of electrical circuits, theoretical foundations of electric traction, mathematical modeling of electrical and energy processes were used for the analysis. **Findings.** The complex of theoretical research and calculations allows confirming the technical possibility of deep attenuation use to regulate the speed regulation and obtain additional across-the-line positions for the rolling stock with DC and PC traction motors. The minimum attenuation coefficient value for different types of traction motors was determined. **Originality.** The methodology for determining the minimum value of the attenuation coefficient for traction motors of main electric locomotives in terms of using deeper magnetic flux control, replacing the use of experimental research data with theoretical studies. The essence of the studies is to form the required type of the limit traction characteristics by reducing the minimum permissible value of the excitation coefficient, which will reduce the electricity consumption. The research on determination of quantitative indicators of electricity consumption for the analysis of energy saving reserves on the main transport was further developed. **Practical value.** The results of theoretical research can be the basis for the modernization of main electric locomotives of direct and pulsating current with the systems of deep attenuation regulation. The research conducted will make it possible to create recommendations on designing the systems of magnetic flux regulation for traction engines with the improved technical and economic characteristics which are capable to increase the transport process efficiency on the main transport.

Keywords: excitation attenuation coefficient; magnetic flux; traction engine; speed; voltage; current; power; traction characteristic; electric locomotive; regulator

REFERENCES

1. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., & Drubetskyi, A. Yu. (2017). Synthesis of systems of mutual loading of drive motors of direct and pulsing current. *Electrification of Transport*, 13, 33-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i13.117823> (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Afanasov, A. M., & Kyslyi, D. N. (2015). Definition of energy saving acceleration modes of trains. *Science and Transport Progress*, 5(59), 40-52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359> (in Ukrainian)
3. Hetman, H. K., & Marikutsa, S. L. (2017). Selection of rational parameters of the nominal mode of electric locomotives. *Science and Transport Progress*, 1(67), 96-105. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92615> (in Ukrainian)
4. Hubskeyi, P., Kuznetsov, V., Drubetskyi, A., Afanasov, A., & Pulin, M. (2018). Studying of the power modes in the traction line for ensuring the high-speed traffic. *Elektrifikaciya transportu*, 15(1(43)), 42-51. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.146665> (in Ukrainian)
5. Gutkin, L. V., Dymant, Yu. N., & Ivanov, I. A. (1981). *Elektropoezd ER200*. Moscow: Transport. (in Russian)
6. Drubetskyi, A. Yu. (2017). Approximation of universal magnetic characteristic for modelling electric traction machines. *Science and Transport Progress*, 1(67), 106-116. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/94031> (in Russian)
7. Drubetskyi, A. Yu. (2017). Calculation of magnetic characteristics of traction electric engine using the improved universal magnetic characteristics. *Science and Transport Progress*, 3(69), 66-76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104559> (in Russian)
8. Kosariev, Ye. M. (2017). Mathematical model of controlled distributed traction DC power supply system. *Elektrifikaciya transportu*, 14, 15-27. (in Ukrainian)
9. *Pro skhvalennja Nacionaljnoji transportnoji strategiji Ukrajiny na period do 2030 roku*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (in Ukrainian)
10. Gavrilovic, I. B. (2017). A mechatronic approach for the detection of wheel slip/slide and antislip control of locomotive with AC traction motors. *American journal of mechanics and applications*, 5(6), 47-52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11> (in English)
11. Sahoo, S. K., & Bhattacharya, T. (2016). Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. In *IEEE Transactions on Power Electronics* (Vol. 31, Iss. 6, pp. 4429-4439). DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398> (in English)
12. Zarri, L., Mengoni, M., Tani, A., Serra, G., Casadei, D., & Ojo, J. O. (2015). Control Schemes for Field Weakening of Induction Machines. In *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (Wemdcd)* (Vol. 1., pp. 146-155). (in English)

Надійшла до редколегії: 13.08.2021

Прийнята до друку: 14.12.2021