

## Дослідження впливу параметрів електропередачі на ефективність вантажного рухомого складу постійного струму

О. М. Горобченко, О. В. Фомін, В. В. Фомін, В. В. Коваленко

*Визначено параметри, що впливають на нерівномірність струморозподілу в силовому колі при веденні вантажних поїздів. Розроблено метод аналітичного розрахунку сукупного впливу всіх факторів на струморозподіл, що дозволило підвищити тягові властивості локомотивів при взаємодії з вантажними вагонами. Результати дослідження можуть бути використані при ремонті вантажного рухомого складу постійного струму та при проектуванні систем керування*

*Ключові слова: транспортна механіка, тяговий двигун, коефіцієнт зчеплення, тягове зусилля, ресурсозбереження, струморозподіл*

### 1. Вступ

Проблема підвищення ефективності експлуатації тягового рухомого складу залишається актуальною протягом всього періоду існування залізниць. Наукові дослідження та нові технічні рішення призвели до значного прогресу в цьому напрямку за останні роки. Завдяки досягненням у галузях хімії, матеріалознавства, промислової електроніки та ін. для рухомого складу стала доступною найновіша елементна база та матеріали, використання яких значно знизило собівартість перевезень, підвищило швидкість руху та надійність рухомого складу. Варто відзначити, що сучасний локомотив є складною, багатофункціональною розвиненою системою. Це обумовлює актуальність досліджень в напрямку удосконалення рухомого складу шляхом визначення та формального опису внутрішніх зав'язків елементів цієї системи.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В теперішній час роботи, спрямовані на підвищення ефективності експлуатації рухомого складу, проводяться за такими основними напрямками: підвищення ефективності перетворення енергії та передачі потужності [1], вдосконалення бортових систем керування, покращення умов реалізації тягового та гальмівного зусиль рухомого складу [2]. Одним з головних факторів підвищення якості зчеплення коліс з рейками є розробка більш досконалих конструкцій екіпажних частин рухомого складу [3–5]. Впровадження нових систем керування локомотивом, як фактору енергоефективності, на сьогодні безпосередньо пов'язане з інтелектуальними технологіями [6, 7].

Але, незважаючи на широкий спектр питань, що вирішуються у наведених та багатьох інших наукових працях, до тепер існують резерви підвищення ефективності рухомого складу. Одним з таких резервів є вдосконалення взаємодії елементів силового кола. Підставами для такої постановки завдання є сучасні

технологічні вимоги до тягових електричних двигунів, колісних пар, тягових редукторів та інших ланок передачі потужності [8]. При виготовленні та експлуатації цих елементів неодмінно виникає різниця в їх характеристиках. Для усунення шкідливого впливу цієї різниці розроблено та впроваджено низку систем: повісного регулювання тягового зусилля [1], динамічного перерозподілу навантажень від колісних пар на рейки [9], вирівнювання струмів по паралельних гілках силового кола [10], вдосконалено конструкцію несучих елементів рухомого складу [11], покращено взаємодію поверхні кочення колеса з рейками і гальмівними колодками [12] та ін. Але поки ці розробки не забезпечили повного використання зчіпної маси локомотивів та максимальної ефективності його експлуатації на всіх режимах роботи [13, 14]. Можливою причиною такого становища є відсутність комплексного підходу до підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси у існуючих дослідженнях. Тобто розроблено достатньо якісні методи для усунення окремих шкідливих впливів на реалізацію тягового зусилля. Але не визначеним залишається їх взаємозв'язок з конструктивними особливостями окремих локомотивів, що можуть як підвищити, так і знизити ефективність кожного метода. Таким чином, питання комплексного врахування окремих параметрів передачі та їх загального впливу на тягове зусилля електровозів постійного струму до тепер достатньо не розроблене.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є розробка комплексної математичної моделі струморозподілу в силовому колі електровоза постійного струму для обґрунтування покращення умов зчеплення та підвищення ефективності експлуатації локомотивів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити вплив нерівномірності струморозподілу в силовому колі на енергоефективність експлуатації електровозів;
- визначити параметри колісно-моторних блоків, що впливають на нерівномірність струморозподілу;
- розробити метод аналітичного розрахунку сукупного впливу конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів на струморозподіл в силовому колі;
- визначити умови усунення нерівномірності струморозподілу.

### **4. Матеріали та методи досліджень**

#### **4. 1. Дослідження впливу нерівномірності струморозподілу в силовому колі на енергоефективність експлуатації електровозів**

Дослідження струморозподілу проведено на електровозі ДЕ1 із застосуванням бортової системи діагностики “Магістраль-ДЕ1”, яка встановлена в кожній секції. Визначено, що нерівномірність струморозподілу виникає на паралельному (П) та на серієс-паралельному (СП) з’єднаннях силового кола. Розподіл струмів зі зміною швидкості представлено на рис. 1, 2. Тут I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> струми в відповідних гілках.

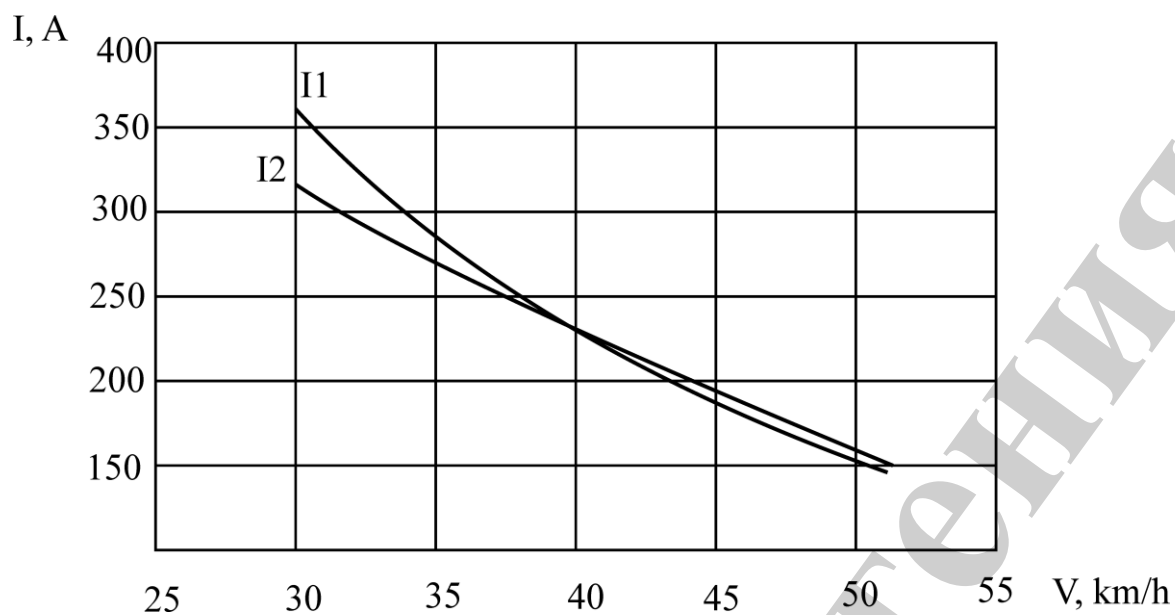


Рис. 1. Залежність струмів навантаження ( $I$ ) від швидкості руху ( $V$ ) при серієс-паралельному з'єднанні двигунів силового кола електровозу

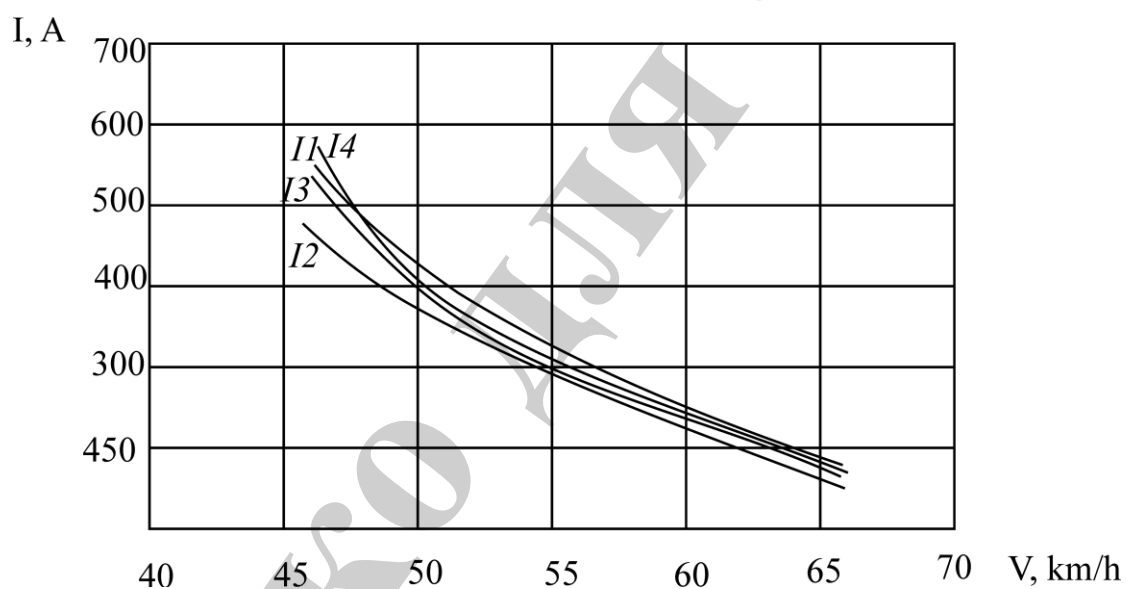


Рис. 2. Залежність струмів навантаження ( $I$ ) від швидкості руху ( $V$ ) при паралельному з'єднанні двигунів силового кола електровозу

Як свідчать дослідження, при збільшенні швидкості руху різниця потужностей по паралельних гілках зменшується (рис. 3).

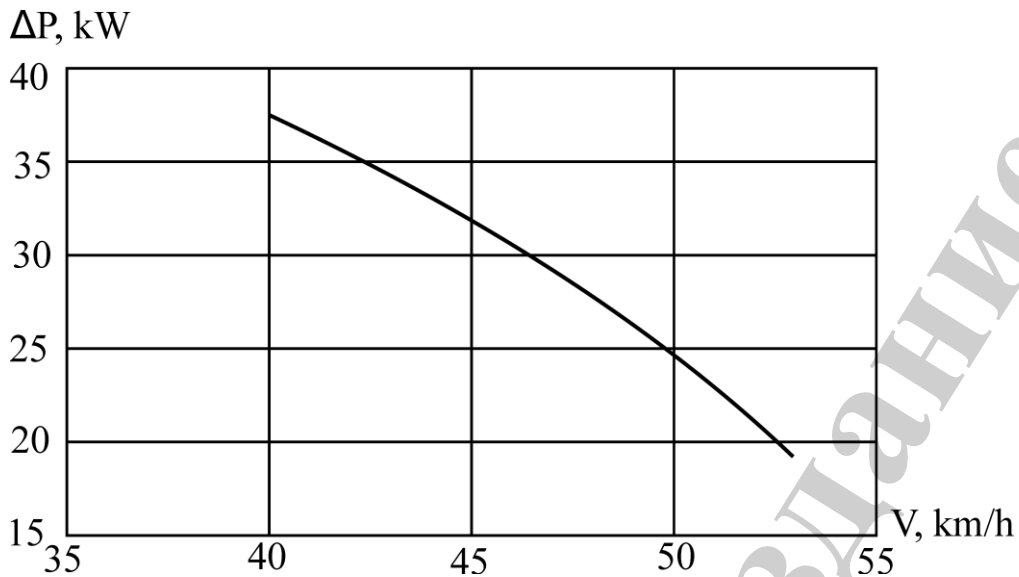


Рис. 3. Залежність різниці потужностей паралельних гілок силового кола ( $\Delta P$ ) від швидкості руху ( $V$ )

Відхилення струмів впливає на силу тяги локомотива, а саме сприяє зниженню. Про це свідчить крива на рис. 4. Величина  $\Delta F$  тут є різницею між розрахунковою силою тяги для даного режиму і показаннями сили тяги системи діагностики.  $\Delta F$  позитивна, тобто зі збільшенням нерівномірності струморозподілу реалізоване тягове зусилля електровоза знижується.

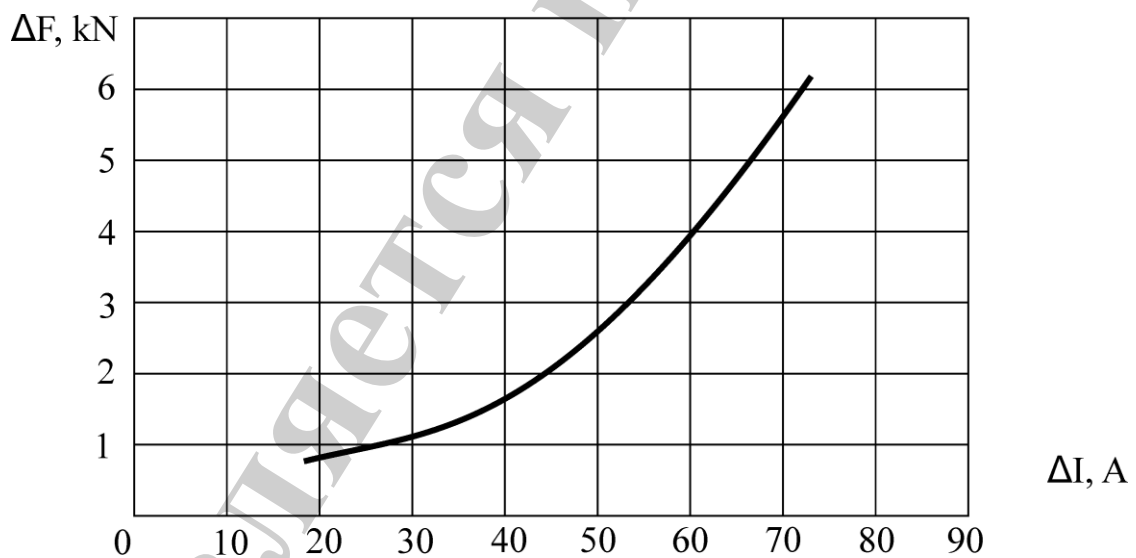


Рис. 4. Середня величина зниження сили тяги ( $\Delta F$ ) локомотивів ДЕ1 залежно від різниці струмів ( $\Delta I$ ) для режимів, близьких до номінального

Таким чином, результати дослідження нерівномірності струморозподілу вказують на те, що існує залежність між величиною відхилення струму тягових двигунів та тяговим зусиллям і енергоефективністю локомотиву. Крім того, різниця потужностей, що реалізуються тяговими двигунами, призводить до нері-

вномірному зношенню вузлів колісно-моторних блоків та зниження експлуатаційної надійності рухомого складу.

#### 4. 2. Визначення параметрів колісно-моторних блоків, що впливають на нерівномірність струморозподілу

*Різниця магнітних характеристик.* В [15] вказується, що відхилення швидкісної характеристики тягового двигуна від розрахункової, як і розбіжність характеристик двигунів між собою, визначається низкою факторів. До них відносяться несиметрія магнітної системи двигунів і положення щіток відносно нейтралі.

Ця складова у свою чергу залежить від поздовжньої сили, що намагнічує, і ступеня насичення магнітної системи.

При зсуві щіток з нейтралі в напрямку обертання якоря тягового двигуна магнітний потік зростає, а частота обертання якоря тягового двигуна зменшується. Зсув щіток проти напрямку обертання якоря, навпаки, приводить до зменшення результуючого потоку двигуна, і частота обертання якоря зростає. Досвід показує, що зсув щіток, наприклад тягового двигуна НБ-406Б, на 1 мм при годинному режимі викликає зміну частоти обертання якоря в середньому на 4,3 об/хв. Ця пропорційність зберігається до зсуву щітки приблизно на 10 мм.

Для двигунів послідовного збудження при відносній жорсткості швидкісних характеристик 2–2,5 відхилення навантажень досягає 15–20 %. Воно істотно зростає при більш жорстких характеристиках двигунів змішаного і незалежного збудження.

Граничні відхилення параметрів тягових електродвигунів при різних режимах роботи регламентуються стандартом на їх виготовлення. Допуск на частоту обертання якоря при роботі на номінальній потужності і повному полі становить  $\pm 3\%$ , при роботі на ослабленому полі до 50 % –  $\pm 3,5\%$  і понад 50 % –  $\pm 6\%$ .

Допуски на частоти обертань при роботі з мінімальними і максимальними швидкостями відповідно становлять  $\pm 3,0$ ;  $\pm 3,0$ ;  $\pm 5\%$ , а також  $\pm 3,5$ ;  $\pm 5,0$ ;  $\pm 7,0\%$  на повному полі, ослабленні поля до 50 % і ослабленні поля понад 50 %.

Визначення нерівномірності струморозподілу від розбіжності магнітних характеристик тягових електродвигунів здійснюється графо-аналітичним методом наступним способом.

Розраховуються швидкісні характеристики тягового електродвигуна з використанням залежності [16]

$$n = \frac{0,5U_{kc} - IR_g}{c_e \Phi}, \quad (1)$$

де  $U_{kc}$  – напруга контактної мережи, В;  $I$  – струм навантаження двигуна, А;  $c_e$  – постійна двигуна по ерс;  $R_g$  – повний опір гарячого тягового електродвигуна, Ом;  $\Phi$  – основний магнітний потік, Вб;

Повний активний опір гарячого тягового електродвигуна визначається з виразу

$$R = (R_{я20} + R_{гп20} + R_{gn20})\beta_t, \quad (2)$$

де  $R_{я20}$  – опір обмотки якоря тягового електродвигуна при 20 °С, Ом;  $R_{гп20}$  – опір обмотки головних полюсів і шунтувальних резисторів при 20 °С, Ом;  $R_{gn20}$  – опір обмотки додаткових полюсів електродвигуна при 20 °С, Ом;  $\beta_t$  – температурний коефіцієнт опору міді обмоток електродвигуна.

Причому

$$R_{гп20} = \frac{R_{гп} \cdot R_m}{R_{гп} + R_m} = \frac{R_{гп} \frac{\alpha}{1-\alpha}}{1 + \frac{\alpha}{1-\alpha}}, \quad (3)$$

де  $R_{гп}$  – опір обмотки головних полюсів тягового електродвигуна при 20 °С, Ом;  $R_m$  – опір шунтуючого резистора, Ом;  $\alpha$  – коефіцієнт ослаблення поля.

$$\Phi = \Phi_{хх} - \Phi_{ря}, \quad (4)$$

де  $\Phi_{хх}$ ,  $\Phi_{ря}$  – магнітні потоки холостого ходу і реакції якоря тягового електродвигуна, Вб.

*Відхилення опорів якірних кіл.* Гілка силового кола сучасних електровозів постійного струму складається з багатьох елементів. Розглядаючи нерівномірність струморозподілу при паралельному з'єднанні тягових двигунів, можна відзначити, що вона залежить від двох груп факторів:

- конструктивних, обумовлених розташуванням тягових електродвигунів, а отже, різницею довжин сполучних проводів і величин опорів резисторів;
- технологічних, залежних від допусків на елементи якірного кола, опорів в електричних контактах.

Розрахунок нерівномірності струморозподілу від розбіжності опорів у групах якірних кіл тягових електродвигунів проводиться графо-аналітично в такий спосіб. Приймається ряд значень опорів якірного кола, рівних номінальному і збільшеним на 5, 10, 15 і 20 %. Для кожного обраного значення струму і опору по формулах розраховуються частоти обертання, магнітні потоки і будуються характеристики.

Визначається значення нерівномірності струморозподілу в характерних точках і будуються залежності максимально можливих величин нерівномірності струморозподілу  $\Delta I$  від відхилень опорів  $\Delta R_g$  якірного кола.

На повному полі збудження мінімальне значення опору одного силового кола, що впливає на нерівномірність струморозподілу, розраховується за формулою (для ДЕ1)

$$R_{\min ГПП} = R_{\text{прmin}} + 2R_g + 9R_{k\min} + R_a, \quad (5)$$

де  $R_{\min\Pi\Pi}$  – мінімальний опір силового кола повного поля, Ом;  $R_{\text{прmin}}$  – опір кабелів, Ом;  $R_{k\min}$  – мінімальний опір контактів якірного кола, Ом;  $R_g$  – опір якірного кола тягового двигуна, Ом;  $R_a$  – опір елементів контролю і автоматики (контакти лінійного контактора, датчики струму навантаження, шунтів амперметрів, контакти гальмового перемикача та ін.)

Для інших серій електровозів постійного струму розрахунок подібний, відрізняється тільки коефіцієнтом при  $R_{k\min}$ , що залежить від компонування схеми.

Аналогічно знаходиться максимальний опір  $R_{\max\Pi\Pi}$  силового кола на повному полі збудження.

Граничний мінімальний опір кола  $R_{\min\text{ОП}}$  при роботі електродвигуна на ослабленому полі збудження становить

$$R_{\min\text{ОП}} = (R_{\min\Pi\Pi} - 2R_{\text{об}}) - \frac{(R_{\text{прmin}} + R_{\text{шmin}} + R_{\text{кшmin}})2R_{\text{об}}}{R_{\text{прmin}} + R_{\text{шmin}} + R_{\text{кшmin}} + 2R_{\text{об}}}, \quad (6)$$

де  $R_{\text{об}}$  – опір обмотки збудження тягового електродвигуна, Ом;  $R_{\text{прmin}}$  – мінімальний опір проводів, Ом;  $R_{\text{ш min}}$  – мінімальний опір шунтуючого резистора, Ом;  $R_{\text{кш min}}$  – мінімальний опір контактора шунтировки, Ом.

Максимальне значення опору якірного кола при ослабленні поля  $R_{\max\text{ОП}}$  визначається аналогічним образом.

*Відхилення опорів кіл збудження.* Коло збудження тягового електродвигуна складається з обмотки збудження тягового електродвигуна, сполучних проводів, індуктивного шунта, резисторів ослаблення поля, контакторів шунтування.

Визначення нерівномірності струморозподілу для різних коефіцієнтів шунтування робимо графоаналітичним методом. Розраховуються значення опорів шунтувальних резисторів, що забезпечують регламентовані величини коефіцієнтів ослаблення поля. Для п'яти обраних значень струмів і коефіцієнтів шунтування визначаються робочі характеристики двигуна. Задавшись відхиленнями величин опорів шунтувальних резисторів, що обумовлюють відхилення ослаблення поля на 10, 20, 30 % від розрахункового, визначаються робочі характеристики для цих відхилень. При цьому в якості базової приймається характеристика, що відповідає розрахунковому коефіцієнту шунтування.

У координатах різниці струмів  $\Delta I$  і процентного відхилення значення опору шунтуючого резистора будуються залежності нерівномірності струморозподілу  $\Delta I$  від процентного відхилення значення опору шунтуючого резистора, що забезпечує ослаблення поля.

Визначаються мінімальне і максимальне значення опору двигуна, обумовлені змінами опорів у колі збудження

$$R_{\min} = 2 \left[ R_g + R_{gr} + \frac{(R_{\text{шmin}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{прmin}} + R_{k\min})2R_{\text{об}}}{R_{\text{шmin}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{прmin}} + R_{k\min}} + 2R_{\text{об}} \right], \quad (7)$$

$$R_{\min} = 2 \left[ R_g + R_{gr} + \frac{(R_{\text{шmax}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{прmax}} + R_{k\max})2R_{\text{об}}}{R_{\text{шmax}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{прmax}} + R_{k\max}} + 2R_{\text{об}} \right]. \quad (8)$$

Визначаються мінімальні і максимальні відхилення опорів кола збудження двигунів з урахуванням допусків при різних ступенях ослаблення поля. Значення нерівномірності струморозподілу визначається як різниця між максимальними і мінімальними значеннями струмів двигунів.

*Зміни діаметрів бандажів колісних пар.* Урахування впливу діаметрів бандажів колісних пар здійснюється в припущенні, що швидкості експлуатаційного ковзання всіх колісних пар однакові, а швидкості надлишкових ковзань дорівнюють нулю.

Будуються характеристики тягового електродвигуна для повного поля і відповідних ступенів ослаблення магнітного потоку (рис. 5).

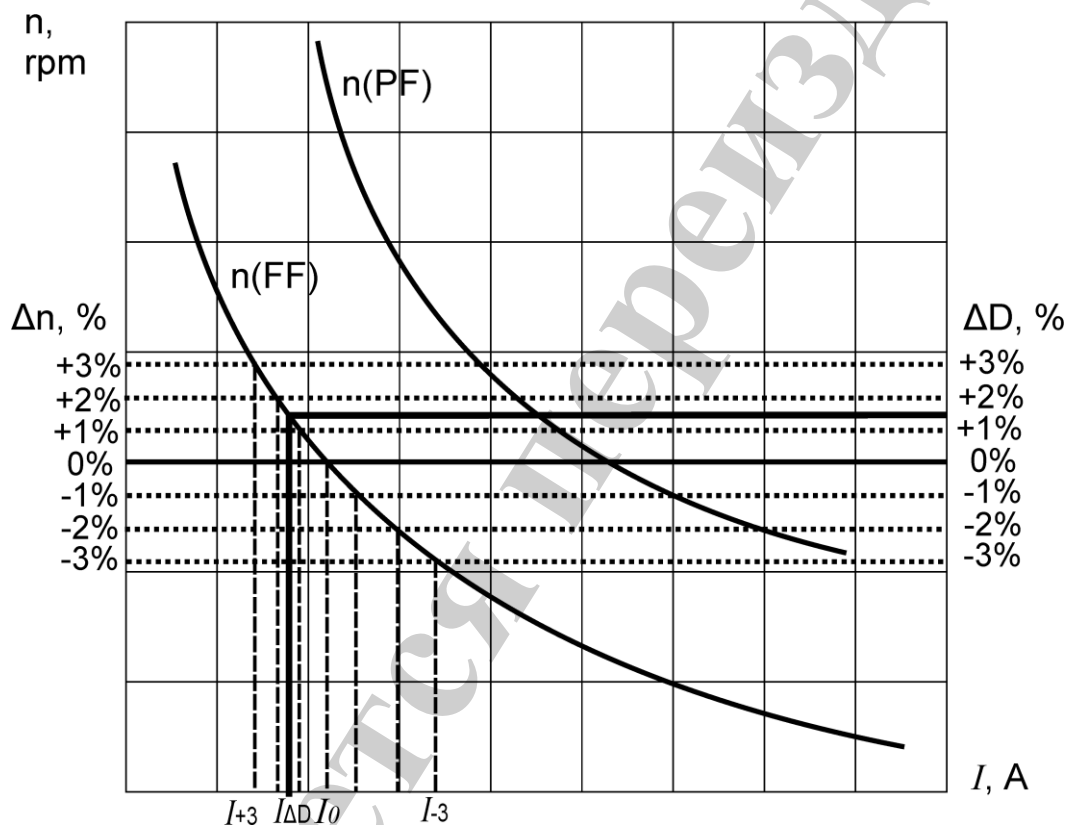


Рис. 4. Схема графоаналітичного методу визначення впливу відхилення діаметру бандажа ( $\Delta D$ ) на струм двигуна ( $I$ ) з урахуванням його характеристик

На вісь ординат з різними знаками наносяться відхилення частот обертання ( $\Delta n$ ) на 1,2 та 3% від вихідних значень. З отриманих характерних точок проводяться паралелі до перетинання з відповідними робочими характеристиками електродвигуна. Із точок перетинання паралелей і характеристик відкладаються перпендикуляри до перетинання з віссю струмів. Відрізки, що відтинаються на осі струму, дорівнюють нерівномірностям струморозподілу. На побудовані графіки наносяться граничні відхилення діаметрів бандажів колісних пар ( $\Delta D$ ), виражені у відсотках. Сума відхилень струму від впливів характеристик двигуна та відхилення діаметру бандажа буде фактичним значенням відхилення струму у зібраного колісно-моторного блоку.



#### 4. 3. Розробка методу аналітичного розрахунку сукупного впливу конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів на струморозподіл

Різницю струмів у паралельно включених двигунах послідовного збудження виразимо через

$$\Delta I = I_1 - I_2, \quad (9)$$

де  $I_1$  – струм навантаження першого двигуна, А;  $I_2$  – струм навантаження другого двигуна, А.

Згідно [16] струм двигуна дорівнює

$$I = \frac{U - c_e \cdot \Phi \cdot n}{R_{\text{екв}}}, \quad (10)$$

де  $U$  – напруга, прикладена до двигуна, В;  $c_e$  – конструкційна постійна машини з ерс;  $\Phi$  – магнітний потік, Вб;  $n$  – частота обертання якоря, об/хв;  $R_{\text{екв}}$  – сумарний опір обмоток тягового двигуна, Ом.

Підставляючи вираз (10) у вираз (9), одержимо:

$$\Delta I = \frac{U - c_e \cdot \Phi_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв1}}} - \frac{U - c_e \cdot \Phi_2 \cdot n_2}{R_{\text{екв2}}}. \quad (11)$$

Виходячи із завдання розрахунку, приймаємо, що в загальному випадку у двигунів є різниця в магнітних потоках, частотах обертання, опорах. Тому, магнітний потік другого електродвигуна можна представити як

$$\Phi_2 = \Phi_1 - \Delta\Phi. \quad (12)$$

Частота обертання другого двигуна

$$n_2 = n_1 - \Delta n. \quad (13)$$

Опір обмоток другого двигуна

$$R_{\text{екв2}} = R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}. \quad (14)$$

Тоді (11) прийме вид

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{U - c_e \cdot \Phi_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв1}}} - \frac{U - c_e \cdot (\Phi_1 + \Delta\Phi) \cdot (n_1 + \Delta n)}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}} = \\ &= \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}} - \Delta R_{\text{екв}} \cdot c_e \cdot \Phi_1 \cdot n_1 + \Delta n \cdot R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot \Phi_1 + n_1 \cdot R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot \Delta\Phi + \Delta n \cdot R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot \Delta\Phi}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} = \\ &= \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}} - \Delta R_{\text{екв}} \cdot c_e \cdot \Phi_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} + \frac{\Delta n \cdot c_e \cdot \Phi_1 + n_1 \cdot c_e \cdot \Delta\Phi + \Delta n \cdot c_e \cdot \Delta\Phi}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Представимо магнітний потік через струм навантаження. Для двигунів послідовного збудження при повному полі

$$\Phi_1 = k_1 I_1, \quad \Phi_2 = k_2 I_2. \quad (16)$$

Тут  $k_1$  і  $k_2$  – змінні коефіцієнти, значення яких змінюється залежно від струмів  $I_1$  і  $I_2$ .

З формули (12)

$$\Delta\Phi = k_1 I_1 - k_2 I_2. \quad (17)$$

Тоді вираз (15) прийме вид

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}} - \Delta R_{\text{екв}} \cdot c_e \cdot k_1 \cdot I_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} + \frac{\Delta n \cdot c_e \cdot k_1 \cdot I_1 + n_1 + c_e \cdot (k_1 \cdot I_1 - k_2 \cdot I_2) + \Delta n \cdot c_e \cdot (k_1 \cdot I_1 - k_2 \cdot I_2)}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}}.$$

Представимо  $I_2$  через  $I_1$ :

$$I_2 = I_1 + \Delta I.$$

Тоді

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}} - \Delta R_{\text{екв}} \cdot c_e \cdot k_1 \cdot I_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} + \frac{\Delta n \cdot c_e \cdot k_1 \cdot I_1 + n_1 + c_e \cdot (k_1 \cdot I_1 - k_2 \cdot (I_1 + \Delta I)) + \Delta n \cdot c_e \cdot (k_1 \cdot I_1 - k_2 \cdot (I_1 + \Delta I))}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}}.$$

Перший дріб розкладаємо на два, розкриваємо дужки в чисельнику другого дробу і розділяємо дробі, що містять у чисельнику  $I_1$  від тих, що містять  $\Delta I$ .

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}}}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} - \frac{\Delta R_{\text{екв}} \cdot c_e \cdot k_1 \cdot I_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} + I_1 \cdot c_e \cdot \frac{2\Delta n \cdot k_1 + n_1 \cdot k_1 - k_2 \cdot n_1 + \Delta n \cdot k_2}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}} + \Delta I \cdot c_e \cdot \frac{-n_1 \cdot k_2 - \Delta n \cdot k_2}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}}.$$

Вирішуємо рівняння відносно  $\Delta I$ :

$$\Delta I \left( 1 + c_e \cdot k_2 \frac{n_1 + \Delta n}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}} \right) = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}}}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} + I_1 \cdot c_e \cdot \left( -\frac{\Delta R_{\text{екв}} \cdot k_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв1}} \cdot (R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}})} + \frac{2\Delta n \cdot k_1 + n_1 \cdot k_1 - k_2 \cdot n_1 + \Delta n \cdot k_2}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}}} \right),$$

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}}}{R_{\text{екв}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_2 \cdot (n_1 + \Delta n)} +$$

$$+ I_1 \cdot c_e \cdot \left( \frac{-\frac{\Delta R_{\text{екв}} \cdot k_1 \cdot n_1}{R_{\text{екв}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_2 \cdot (n_1 + \Delta n)}}{+ \frac{2\Delta n \cdot k_1 + n_1 \cdot k_1 + k_2 \cdot n_1 - \Delta n \cdot k_2}{R_{\text{екв}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_2 \cdot (n_1 + \Delta n)}} \right) \quad (18)$$

Залежність величини магнітного потоку від струму двигуна представимо в аналітичній формі. В результаті розбивання кривої залежності  $\Phi(I)$  на три ділянки, апроксимації середньої криволінійної частини можна записати формулу магнітного потоку двигуна. Для двигуна серії НБ-406Б у наступному вигляді:

$$\Phi = \begin{cases} 0,000588I & \text{при } 0 \leq I \leq 200, \\ 1,54321 \cdot 10^9 \cdot I^3 - 1,74537 \cdot 10^6 I^2 - \\ -0,000768241 \cdot I + 0,021421 & \text{при } 200 < I < 380, \\ 0,00008955 \cdot I + 0,11197 & \text{при } 380 \leq I \leq 600. \end{cases} \quad (19)$$

Для двигунів серії ЕД141АУ1 (локомотив ДЕ1) визначення залежності магнітного потоку від струму навантаження виконується подібним чином на підставі його характеристик.

Формула (19) описує стандартний (еталонний) тяговий електродвигун, що не має відхилень від паспортних даних. Однак у реальних двигунах присутні відхилення в характеристиках, що мають різні причини. Судити про ці відхилення можна на підставі даних стендових випробувань, занесених у паспорт двигуна.

Припустимо, при вимірі на стенді виявилось, що в ТЕД, що перевіряється, частота обертання виявилася  $n_i$  – відмінною від еталонної. Припускаючи, що всі інші параметри рівні, знайдемо магнітний потік для  $n_i$ .

$$\Phi_i = \frac{U - IR_a}{n_i c_e}, \quad (20)$$

де  $n_i$  – частота, вимірювана на стенді при випробуваннях.

Неважно бачити, що

$$\Phi_i = \frac{n_n}{n_i} \Phi_n. \quad (21)$$

Величину

$$k_n = n_n / n_i \quad (22)$$

назвемо коефіцієнтом відхилення магнітного потоку, що показує, у скільки разів магнітний потік еталонного двигуна відрізняється від магнітного потоку реального двигуна. Тоді

$$\Phi_i = k_{ni} \Phi_{II}. \quad (23)$$

Відповідно до цих міркувань формула частоти обертання для кожного реального двигуна

$$n_i = \frac{U - R_a \cdot I}{c_e \cdot k_n \cdot \Phi_{II}} \quad (24)$$

або

$$n = \begin{cases} \frac{U - R \cdot I}{c_e \cdot k_n \cdot 0,000588 \cdot I} & \text{при } 0 \leq I \leq 200, \\ \frac{U - R \cdot I}{c_e \cdot k_n \cdot (1,54321 \cdot 10^9 \cdot I^3 - 1,74527 \cdot 10^6 \cdot I^2 - 0,000768241 \cdot I + 0,021421)} & \text{при } 200 < I < 380, \\ \frac{U - R \cdot I}{c_e \cdot k_n \cdot (0,00008955 \cdot I + 0,11197)} & \text{при } 380 \leq I \leq 600. \end{cases}$$

Вертаючись до формул (16), магнітний потік можна представити у вигляді

$$\Phi_1 = k_{n1} k_{ет1} I_1, \quad \Phi_2 = k_{n2} k_{ет2} I_2, \quad (25)$$

де  $k_{n1}$ ,  $k_{n2}$  – коефіцієнти відхилення потоків першого і другого двигунів;  $k_{ет}$  – коефіцієнт пропорційності між магнітним потоком і струмом навантаження еталонного двигуна.

У формулі (18) приводимо значення коефіцієнтів  $k_1$  і  $k_2$  до  $k_{ет}$ ,  $k_{п1}$ ,  $k_{п2}$ .

$$\begin{aligned} \Delta I = & \frac{U \cdot \Delta R_{скв}}{R_{скв1}^2 + R_{скв1} \cdot \Delta R_{скв} + R_{скв1} \cdot c_e \cdot k_{ем} \cdot k_{n2} \cdot (n_1 + \Delta n)} + \\ & + I_1 \cdot c_e \cdot \left( - \frac{\Delta R_{скв} \cdot k_{ем} \cdot k_{n1} \cdot n_1}{R_{скв}^2 + R_{скв1} \cdot \Delta R_{скв} + R_{скв1} \cdot c_e \cdot k_{ем} \cdot k_{n2} \cdot (n_1 + \Delta n)} + \right. \\ & \left. + \frac{2\Delta n \cdot k_{ем} \cdot k_{n1} + n_1 \cdot k_{ем} \cdot k_{n1} - k_{ем} \cdot k_{n2} \cdot n_1 - \Delta n \cdot k_{ем} \cdot k_{n2}}{R_{скв1} + \Delta R_{скв} + c_e \cdot k_{ем} \cdot k_{n2} \cdot (n_1 + \Delta n)} \right), \\ \Delta I = & \frac{U \cdot \Delta R_{скв}}{R_{скв1}^2 + R_{скв1} \cdot \Delta R_{скв} + R_{скв1} \cdot c_e \cdot k_{ем} \cdot k_{n2} \cdot (n_1 + \Delta n)} + \\ & + I_1 \cdot c_e \cdot k_{ем} \cdot \left( - \frac{\Delta R_{скв} \cdot k_{n1} \cdot n_1}{R_{скв}^2 + R_{скв1} \cdot \Delta R_{скв} + R_{скв1} \cdot c_e \cdot k_{ем} \cdot k_{n2} \cdot (n_1 + \Delta n)} + \right. \\ & \left. + \frac{2\Delta n \cdot k_{n1} + n_1 \cdot k_{n1} - k_{n2} \cdot n_1 - \Delta n \cdot k_{n2}}{R_{скв1} + \Delta R_{скв} + c_e \cdot k_{ем} \cdot k_{n2} \cdot (n_1 + \Delta n)} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Частоти обертання в (25) для розрахунку доцільно виразити через швидкість руху. Згідно [17],

$$n = \frac{V \cdot i \cdot 60}{\pi \cdot D_0} \quad (27)$$

де  $V$  – швидкість руху, км/год;  $i$  – передаточне число тягового редуктора;  $D_6$  – діаметр бандажа, м.

Тоді, з огляду на (27) і те, що  $\Delta n = n_1 - n_2$ ,

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}}}{R_{\text{екв1}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi} \left( \frac{2}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)} +$$

$$+ I_1 \cdot c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot \left[ - \frac{\Delta R_{\text{екв}} \cdot k_{n1} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_1}}{R_{\text{екв1}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi} \left( \frac{2}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)} + \right.$$

$$\left. + \frac{2 \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi} (D_1 - D_2) \cdot k_{n1} + V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_1} \cdot k_{n1} - k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_1} - V \frac{i \cdot 60}{\pi} (D_1 - D_2) \cdot k_{n2}}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}} + c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi} \left( \frac{2}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)} \right],$$

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}}}{R_{\text{екв1}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi} \left( \frac{2}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)} +$$

$$+ I_1 \cdot V \frac{i \cdot 60 \cdot c_e \cdot k_{\text{ст}}}{\pi \cdot D_1} \left[ - \frac{\Delta \sum R \cdot k_{n1} \frac{1}{D_1}}{R_{\text{екв1}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi} \left( \frac{2}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)} + \right.$$

$$\left. + \frac{2 \cdot (D_1 - D_2) \cdot k_{n1} + \frac{1}{D_1} \cdot k_{n1} - k_{n2} \cdot \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \cdot k_{n2}}{R_{\text{екв1}} + \Delta R_{\text{екв}} + c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi} \left( \frac{2}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)} \right]. \quad (28)$$

Вираз (28) демонструє структуру виникнення нерівномірності струморозподілу в силовому колі електровозів. В ньому враховані основні фактори, що впливають відхилення струму – різниця електричних опорів, діаметрів бандажів та магнітних потоків.

## 5. Результати дослідження струморозподілу в силовому колі

Підсумовуючи вищенаведений порядок розрахунку, у загальному вигляді відхилення струмів можна представити як

$$\Delta I = \rho + I_1 \cdot \varepsilon, \quad (29)$$

де

$$\rho = \frac{U \cdot \Delta R_{\text{екв}}}{R_{\text{екв1}}^2 + R_{\text{екв1}} \cdot \Delta R_{\text{екв}} + R_{\text{екв1}} \cdot c_e \cdot k_{\text{ст}} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_2}};$$

$$\varepsilon = V \frac{i \cdot 60 \cdot c_e \cdot k_{ет}}{\pi} \left( - \frac{\Delta R_{екв} \cdot k_{n1} \cdot \frac{1}{D_1}}{R_{екв1}^2 + R_{екв1} \cdot \Delta R_{екв} + R_{екв1} \cdot c_e \cdot k_{ет} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_2}} + \frac{2 \cdot \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \cdot k_{n1} + \frac{1}{D_1} \cdot k_{n1} - k_{n2} \cdot \frac{1}{D_1} - \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \cdot k_{n2}}{R_{екв1} \cdot \Delta R_{екв} \cdot c_e \cdot k_{ет} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_2}} \right)$$

Коефіцієнти  $\rho$  і  $\varepsilon$  у загальному випадку залежать від підведеної напруги, швидкості руху, різниці омичних опорів кіл двигунів, конструкції машини, коефіцієнтів відхилення потоку і діаметра бандажів колісних пар двигуна. Тобто:

$$\rho = f(U, \Delta R_{екв}, V, c_e, k_{ет}, k_{п2}, i, D_2), \quad (30)$$

$$\varepsilon = f(\Delta R_{екв}, V, c_e, k_{ет}, k_{п1}, k_{п2}, i, D_2, D_1). \quad (31)$$

При  $\Delta R_{екв} = 0$  вираз (29) приймає вид

$$\Delta I = I_1 \cdot V \frac{i \cdot 60 \cdot c_e \cdot k_{ет}}{\pi} \times \frac{2 \cdot \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \cdot k_{n1} + \frac{1}{D_1} \cdot k_{n1} - k_{n2} \cdot \frac{1}{D_1} - \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \cdot k_{n2}}{R_{екв1} + c_e \cdot k_{ет} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_2}}. \quad (32)$$

При  $D_1 = D_2$  вираження (29) приймає вид

$$\Delta I = \frac{U \cdot \Delta R_{екв}}{R_{екв1}^2 + R_{екв1} \cdot \Delta R_{екв} + R_{екв1} \cdot c_e \cdot k_{ет} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_2}} + I_1 \cdot V \frac{i \cdot 60 \cdot c_e \cdot k_{ет}}{\pi} \times \left( - \frac{\Delta R_{екв} \cdot k_{n1} \cdot \frac{1}{D_1}}{R_{екв1}^2 + R_{екв1} \cdot \Delta R_{екв} + R_{екв1} \cdot c_e \cdot k_{ет} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_2}} + \frac{\frac{1}{D_1} \cdot k_{n1}}{R_{екв1} + \Delta R_{екв} + c_e \cdot k_{ет} \cdot k_{n2} \cdot V \frac{i \cdot 60}{\pi \cdot D_2}} \right). \quad (33)$$

Таким чином розроблено підхід до виявлення та оцінки окремих факторів, що впливають на нерівномірність струморозподілу в силовому колі.

## 6. Обговорення результатів дослідження силового кола тягового рухомого складу

Результати дослідження дозволяють стверджувати, що для усунення величини відхилення струмів необхідно, щоб  $\rho = 0$  і  $\varepsilon = 0$ , тобто чисельники дробів оберталися в 0. Проаналізуємо умови їхньої рівності нулю.

$$U \cdot \Delta R_{\text{екв}} = 0, \quad (34)$$

$$\Delta R_{\text{екв}} \cdot k_{n1} \cdot \frac{1}{D_1} = 0, \quad (35)$$

$$2 \cdot \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \cdot k_{n1} + \frac{1}{D_1} \cdot k_{n1} - \\ - k_{n2} \cdot \frac{1}{D_1} - \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \cdot k_{n2} = 0. \quad (36)$$

Для виконання умов (34) і (35) досить, щоб було відсутнє відхилення омічних опорів у колах двигунів. В умовах експлуатації величина  $\Delta R_{\text{екв}}$  не значна і нею можна зневажити. У результаті не складних перетворень видно, що для виконання умови (36) необхідно, щоб виконувалася рівність (37)

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{-k_{n2} + 2k_{n1}}{3k_{n1} - 2k_{n2}}. \quad (37)$$

Таким чином, при підборі колісно-моторних блоків у депо необхідно прагнути до дотримання рівняння (37). Якщо необхідно підібрати колісну пару, то потрібно користуватися формулою (38)

$$D_2 = D_1 \frac{-k_{n2} + 2k_{n1}}{3k_{n1} - 2k_{n2}}. \quad (38)$$

Якщо ж підбирається двигун – формулою (39)

$$k_{n2} = k_{n1} \frac{3D_2 + 2D_1}{2D_2 - D_1}. \quad (39)$$

Якщо робити розрахунки  $\Delta I$  для конкретного локомотива, то величини  $c_e$ ,  $k_{\text{ет}}$ ,  $k_{n1}$ ,  $k_{n2}$ ,  $i$ , приймуть цілком визначені значення, незмінні в процесі експлуатації.  $D_1$ ,  $D_2$  хоч і змінюються, але настільки тривало за часом, що для цілей даного розрахунку їх можна прийняти постійними.  $\Delta R_{\text{екв}}$  піддано змінам під впливом температури нагрівання, тобто  $\Delta R_{\text{екв}} = f(T)$ .

У зв'язку із цим вирази (30) і (31) приймають вид

$$\rho = f(U, \Delta \Sigma R, V), \quad (40)$$

$$\varepsilon = f(\Delta \Sigma R, V). \quad (41)$$

Визначення умови відсутності різниці струмів.

Різниця струмів паралельних гілок силового кола залежить від сили струму і коефіцієнтів  $\rho$  і  $\varepsilon$  відповідно до формули (29).

Якщо припустити, що  $\Delta I = 0$ , то одержимо

$$0 = \rho + I_1 \cdot \varepsilon.$$

Звідси

$$I_1 = -\frac{\rho}{\varepsilon}. \quad (52)$$

Вираз (52) можна вважати умовою відсутності різниці струмів, тобто величина струму тягового електродвигуна повинна дорівнювати негативному значенню відносини  $\rho$  до  $\varepsilon$  на всіх режимах роботи.

Аналізуючи наведені результати, необхідно відмітити, що вони отримані з метою забезпечення строго рівномірного розподілення струмів по паралельних гілках силового кола. Вираз (52) не важко закласти в алгоритм функціонування автоматизованих систем регулювання струму. Проте з урахуванням явища динамічного перерозподілу навантажень від колісних пар локомотива під час реалізації тягового зусилля [18] існує можливість більш досконалого регулювання струмів. Вона базується на оцінці поточного значення зчіпної маси окремих осей: зменшення струму двигуна розвантаженої колісної пари та збільшення струму двигуна довантаженої осі. Але такий підхід потребує подальших досліджень. Таким чином, наведені результати можна рекомендувати до використання поки що тільки при комплектуванні колісно-моторних блоків в умовах депо або заводів.

На основі наведених моделей для отримання динамічної умови максимізації коефіцієнта використання зчіпної маси необхідно провести подальші дослідження. Результатом може стати уточнений алгоритм автоматичного керування тяговою передачею, реалізація якого дозволить ще підвищити ефективність експлуатації тягового рухомого складу.

## 7. Висновки

1. Встановлено негативний вплив нерівномірності струморозподілу в силовому колі на ефективність експлуатації локомотивів. Результати вимірювань показують, що загальна потужність, реалізована локомотивом, знижується на 30–37 кВт (близько до 1 %). Сила тяги також зменшується на величину до 6 кН (до 1,5 %). Тому можна зробити висновок, що існують певні резерви підвищення ефективності експлуатації тягового рухомого складу постійного струму (ДЕ1, ВЛ8, ВЛ10 та подібних) за рахунок вирівнювання струмів по двигунах.

2. Виявлено та проведено оцінку впливу різних факторів на рівномірність струморозподілу. В умовах експлуатації до таких факторів відносяться різниця магнітних характеристик тягових двигунів (до 5 %), відхилення опорів якірних кіл та кіл збудження двигунів (до 9 %), різниця діаметрів бандажів колісних пар у межах одного візка (до 1 %) та в межах локомотива (до 2 %).

3. В результаті використання розробленого методу розрахунку вдалось проаналізувати вплив різних факторів на струморозподіл і взаємозв'язок між параметрами паралельно включених електродвигунів. Вони наочно показують, що на відхилення струмів впливають не тільки окремі параметри колісно-



моторних блоків, але і їхнє сполучення. Також перевагою даного метода є можливість оцінки нерівномірності струморозподілу залежно від конструкції машини та від сполучення конструктивних параметрів колісно-моторного блоку.

### Література

1. Koblov R., Novachuk I., Egorov P. New Interpretation of Process of Formation of Tractive Effort of the Locomotive // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 803–808. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.444
2. Dincer I., Hogerwaard J., Zamfirescu C. Integrated Locomotive Systems // *Clean Rail Transportation Options*. Springer, 2015. P. 115–136. doi: 10.1007/978-3-319-21726-0\_6
3. Slivinskiy Y. V., Yu Radin S., Gridchina I. N. The Development of Technical Solutions for the Transverse Arrangement of Wheelsets of the Triaxial Non-Pedestal Bogies for Locomotives // *Indian Journal of Science and Technology*. 2015. Vol. 8, Issue 34. doi: 10.17485/ijst/2015/v8i34/85275
4. Goryacheva I. G., Soshenkov S. N., Torskaya E. V. Modelling of wear and fatigue defect formation in wheel–rail contact // *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51, Issue 6. P. 767–783. doi: 10.1080/00423114.2011.602419
5. Fomin O. V. Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages // *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2015. Issue 3. P. 68–76.
6. Energy-Efficient Locomotive Operation for Chinese Mainline Railways by Fuzzy Predictive Control / Bai Y., Ho T. K., Mao B., Ding Y., Chen S. // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014. Vol. 15, Issue 3. P. 938–948. doi: 10.1109/tits.2013.2292712
7. Tartakovskiy E., Gorobchenko O., Antonovych A. Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, Issue 3 (83). P. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198
8. Liudvinavičius L., Bureika G. Theoretical and practical perspectives of diesel locomotive with DC traction motors wheel-sets' slipping and sliding control // *Transport*. 2011. Vol. 26, Issue 4. P. 335–343. doi: 10.3846/16484142.2011.633339
9. Garg V. Dynamics of railway vehicle systems. Ottawa: Elsevier, 2012. 407 p.
10. De Souza R. R., Gules R. Modeling of a high power IGBT for a 1000A DC-DC converter used to drive diesel-electric locomotive traction motors // 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). 2016. doi: 10.1109/induscon.2016.7874500
11. Kelrykh M., Fomin O. Perspective directions of planning carrying systems of gondolas // *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. Issue 6. P. 57–60.
12. Slipping and skidding occurrence probability decreasing by means of the friction controlling in the wheel-braking pad and wheel-rail contacts / Gerlici J., Gorgunov M., Kravchenko K., Domin R., Kovtanets M., Lack T. // *Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 17. P. 179–186.

13. Горобченко О. М. Визначення параметрів функції корисності рішень СППР для локомотивних бригад // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2014. № 149. С. 80–87.
14. Бутько Т. В., Бабанін О. Б., Горобченко О. М. Обґрунтування виду функції приналежності нечітких параметрів локомотивних інтелектуальних систем керування // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. Т. 1, № 3 (73). С. 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2015.35996
15. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. Design of rotating electrical machines. New York: John Wiley & Sons, 2013. doi: 10.1002/9781118701591
16. Tong W. Mechanical design of electric motors. Boca Raton: CRC press, 2014.
17. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги. Т. 1: монография. Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. 456 с.
18. Simson S. A., Cole C. Simulation of curving at low speed under high traction for passive steering hauling locomotives // Vehicle System Dynamics. 2008. Vol. 46, Issue 12. P. 1107–1121. doi: 10.1080/00423110701883163