

УДК 629.431 : 629.432

В.Х.ДАЛЕКА, д-р техн. наук, В.І.СКУРІХІН
Харківська національна академія міського господарства
Є.В.НОВИКОВ
ДП «Харківський метрополітен»

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ КОЛІСНО-МОТОРНИХ БЛОКІВ ВАГОНІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Розглядається питання підвищення якості ремонту та рівня ресурсозбереження на метрополітені. Пропонуються метод, що оптимізує вибір колісно-моторних блоків вагонів метрополітену.

У багатодвигунових транспортних засобах може проявлятися нерівномірність струму між тяговими електродвигунами, яка може досягати 53% від середнього значення струму, що споживається двигуном. Вона обумовлена сукупністю конструктивних, технологічних і експлуатаційних чинників [1-3].

Нерівномірність струморозподілу між тяговими двигунами призводить до погіршення тягово-гальмівних властивостей рухомого складу, підвищеного зносу елементів колісно-моторних блоків (КМБ), рейок, перегріву окремих двигунів і зниження їх технічного ресурсу.

У світовій практиці відомі технічні рішення, які направлені на вирівнювання струмів тягових двигунів [4-7]. Суть їх зводиться до створення спеціальних пристроїв, що порівнюють струми окремих електродвигунів з подальшою дією на той чи інший двигун.

Такі пристрої мають високу чутливість, але ускладнюють схему рухомого складу і знижують надійність його роботи.

Найбільш поширений спосіб зниження нерівномірності струморозподілу за допомогою відповідного підбору тягових двигунів і колісних пар по кругу катання [8]. При цьому позитивні допуски частоти обертання на тягові двигуни компенсуються негативними допусками на діаметр коліс колісних пар. Вагони метрополітену мають ряд особливостей конструкції і експлуатації, тому застосування способу підбору тягових двигунів і колісних пар має свою специфіку.

Мета даного дослідження полягає в оптимізації підбору колісно-моторних блоків з мінімальною відносною різницею лінійних швидкостей колісних пар по поверхні катання.

Вагони метрополітену мають чотири колісні пари з індивідуальним моторним приводом. Колісна пара з приводом утворює колісно-моторний блок. Кожний КМБ характеризується особистими швидкісними і тягово-динамічними показниками. Узгодження між собою цих показників КМБ вагону має значення з точки зору зниження:

- динамічної взаємодії ходових частин вагону і рейок колії;
- ресурсу тягових елементів;

- напруження у зварних швах елементів візків;
- витрат ресурсів з точки зору ресурсозбереження.

У вагонах метрополітену розташовано по два колісно-моторних блока на кожному візку. За електричною схемою тягові двигуни з'єднані попарно послідовно-паралельно. Таким чином послідовно з'єднані у парі працюють 1 і 3, 2 і 4 тягові двигуни. Напрямок обертання валів тягових двигунів при цьому – ліворуч 1 і 3, праворуч – 2 і 4, при напрямку руху вагону „вперед” і навпаки при напрямку руху вагону „назад”.

За технічними вимогами на складання візків вагонів метрополітену допускається:

- різниця діаметрів коліс колісних пар у одному візку не більше 8 мм, при випуску з підйомочного ремонту, а в експлуатації – 10 мм;
- різниця діаметрів коліс колісних пар у різних візках не більше 16 мм, при випуску з підйомочного ремонту, а в експлуатації – 25 мм;
- частота обертання тягових двигунів може мати відхилення від номінального $\pm 4\%$;
- частота обертання тягових двигунів при зміні напрямку обертання може мати відхилення до 4%.

Для якісної оцінки швидкісних характеристик КМБ можна скористуватися таким показником, як лінійна швидкість на поверхні катання бандажа, яку можна визначити за формулою

$$V_n = \pi D_n N_n i, \quad (1)$$

де D – діаметр коліс колісної пари, мм; N – частота обертів валу тягового двигуна об./хв; n – номер колісної пари і тягового двигуна на вагоні; i – передаточне число редуктору колісної пари.

Оскільки передаточне число редукторів колісних пар однакове, то у формулі лінійної швидкості (1) воно не враховується, з огляду на те, що в подальшому порівняння лінійних швидкостей будуть проводитися у відносних одиницях.

Порівнянню підлягають:

- з'єднані КМБ у кожному візку 1-2 і 2-4;
- КМБ між візками, тягові двигуни яких за електричною схемою послідовно і працюють у парі, тобто 1-3 і 2-4.

Порівняння зручно проводити у відсотковому вираженні відносної різниці лінійних швидкостей КМБ – $\Delta\%$:

для візка 1

$$\Delta_{1-2} = (V_1 - V_2) / V_1 \cdot 100\%; \quad (2)$$

для візка 2

$$\Delta_{3-4} = (V_3 - V_4)100 / V_3 \% ; \quad (3)$$

між візками 1-2

$$\Delta_{1-3} = (V_1 - V_3)100 / V_1 \% ; \quad (4)$$

$$\Delta_{2-4} = (V_2 - V_4)100 / V_2 \% . \quad (5)$$

З урахуванням підстановки формули (1) у формули (2)-(5) отримуємо відносну різницю швидкості КМБ у визначених комбінаціях:

$$\Delta_{1-2} = (\pi D_1 N_1 i - \pi D_2 N_2 i)100 / \pi D_1 N_1 i = (D_1 N_1 i - D_2 N_2 i)100 / D_1 N_1 i \% ; \quad (6)$$

$$\Delta_{3-4} = (\pi D_3 N_3 i - \pi D_4 N_4 i)100 / \pi D_3 N_3 i = (D_3 N_3 i - D_4 N_4 i)100 / D_3 N_3 i \% ; \quad (7)$$

$$\Delta_{1-3} = (\pi D_1 N_1 i - \pi D_3 N_3 i)100 / \pi D_1 N_1 i = (D_1 N_1 i - D_3 N_3 i)100 / D_1 N_1 i \% ; \quad (8)$$

$$\Delta_{2-4} = (\pi D_2 N_2 i - \pi D_4 N_4 i)100 / \pi D_2 N_2 i = (D_2 N_2 i - D_4 N_4 i)100 / D_2 N_2 i \% . \quad (9)$$

Для напрямку руху вагону „ вперед”

$$\Delta_{1-2} = (D_1 N_{1 \text{ лів}} i - D_2 N_{2 \text{ пр}} i)100 / D_1 N_{1 \text{ лів}} i \% ; \quad (10)$$

$$\Delta_{3-4} = (D_3 N_{3 \text{ лів}} i - D_4 N_{4 \text{ пр}} i)100 / D_3 N_{3 \text{ лів}} i \% ; \quad (11)$$

$$\Delta_{1-3} = (D_1 N_{1 \text{ лів}} i - D_3 N_{3 \text{ лів}} i)100 / D_1 N_{1 \text{ лів}} i \% ; \quad (12)$$

$$\Delta_{2-4} = (D_2 N_{2 \text{ пр}} i - D_4 N_{4 \text{ пр}} i)100 / D_2 N_{2 \text{ пр}} i \% . \quad (13)$$

Для напрямку руху вагону „ назад”

$$\Delta_{1-2} = (D_1 N_{1 \text{ пр}} i - D_2 N_{2 \text{ лів}} i)100 / D_1 N_{1 \text{ пр}} i \% ; \quad (14)$$

$$\Delta_{3-4} = (D_3 N_{3 \text{ пр}} i - D_4 N_{4 \text{ пр}} i)100 / D_3 N_{3 \text{ пр}} i \% ; \quad (15)$$

$$\Delta_{1-3} = (D_1 N_{1 \text{ пр}} i - D_3 N_{3 \text{ лів}} i)100 / D_1 N_{1 \text{ пр}} i \% ; \quad (16)$$

$$\Delta_{2-4} = (D_2 N_{2 \text{ лів}} i - D_4 N_{4 \text{ лів}} i)100 / D_2 N_{2 \text{ лів}} i \% . \quad (17)$$

Для визначених допусків діаметрів коліс колісних пар та частоти обертання тягових двигунів у обох напрямках руху максимальна відносна різниця лінійних швидкостей КМБ може досягати 9,5%. Але при оптимальному виборі КМБ, з урахуванням руху вагона в обох напрямках, та за умови вибору з тих самих колісних пар і тягових двигунів, максимальна різниця лінійних швидкостей КМБ може бути знижена до 5,1%.

Для вибору оптимальної комбінації розташування колісних пар і тягових двигунів на візках вагону необхідно проаналізувати всі можливі відносні різниці швидкості КМБ .

Як показали розрахунки, число можливих комбінацій КМБ досягає 184. Для спрощення порівняння та вибору оптимального варіанту розміщення КМБ можливо порівнювати середньоарифметичне відношення різниць лінійних швидкостей кожного варіанту підбору КМБ.

$$A_i = [(\Delta_{1-2} + \Delta_{3-4} + \Delta_{1-3} + \Delta_{2-4})v + (\Delta_{1-2} + \Delta_{3-4} + \Delta_{1-3} + \Delta_{2-4})n] / 8, \% \quad (18)$$

де A_i – середньоарифметичне відношення різниць лінійних швидкостей варіанту підбору КМБ; i – номер варіанту підбору КМБ; v – індекс варіантів підбору КМБ у напрямку руху „вперед”; n – індекс варіантів підбору КМБ у напрямку руху „назад”.

Оптимальним варіантом є варіант з найменшим значенням середньоарифметичного відношення різниць лінійних швидкостей КМБ.

Таким чином, для розрахунку швидкісних характеристик 184 варіантів комбінацій КМБ і вибору оптимального варіанту потрібно виконати 7360 арифметичних дій, що, безперечно, на практиці неефективно.

Для скорочення часу по розрахунках і аналізу варіантів підбору КМБ та зниження вимог до кваліфікації працівників, які виконують ці розрахунки, розроблена комп'ютерна програма. До таблиці вихідних даних вносять дані:

- номер вагону та його модель;
- номер та діаметр колісних пар;
- номер тягових двигунів та частота оберту валу в різних напрямках.

Після вводу даних виконується розрахунок та вибір оптимального варіанту підбору КМБ з мінімальною відносною різницею лінійних швидкостей. Надається таблиця розрахунків відносної різниці лінійних швидкостей КМБ і протокол комплектації КМБ.

Програмою передбачено встановлення обмеження значення різниці лінійних швидкостей КМБ і якщо не знайдено варіант, то протокол комбінацій підбору недоступний. У такому разі замінюють колісну пару або тяговий двигун з іншими даними і повторюють розрахунок.

Програма надає можливість вибору варіанту підбору КМБ у ручному режимі за уподобанням оператора. За протоколом підбору КМБ проводиться складання візків і вагону. Технічний контроль виробництва також керується даними цього протоколу. Інформація про вибір КМБ для кожного вагону зберігається в пам'яті комп'ютера.

При аналізі роботи механічного і тягового обладнання рухомого складу (підвищеного зносу ходової частини, перегріву тягових двигунів, тощо) необхідно перевірити стан підбору КМБ за допомогою програми і порівняти з можливим оптимальним підбором КМБ.

Розглянемо конкретний приклад.

Технічні норми допусків на характеристики колісних пар і тягових двигунів, при випуску з ремонту можуть утворювати передумови до значних розбіжностей характеристик КМБ. Зменшення цих розбіжностей можливо при проведенні аналізу швидкісних характеристик КМБ і відповідного підбору як колісних пар з тяговими двигунами, так і КМБ між собою у візку, а також між візками у вагоні.

Розгляд швидкісних характеристик і варіантів вибору КМБ проводиться за умови руху вагону самостійно, – не в складі потягу, де накладається сумарна дія руху всіх вагонів.

Швидкість КМБ визначається формулою (1) для обох напрямків руху вагону.

Для зручності порівняння варіантів підбору КМБ можна проводити за середніми показниками швидкості вагону.

Середнє арифметичне значення швидкості вагону визначається за формулами:

при напрямку руху „вперед”

$$V_{с.а.в} = (V_{1в} + V_{2в} + V_{3в} + V_{4в}) / 4; \quad (19)$$

при напрямку руху „назад”

$$V_{с.а.н} = (V_{1н} + V_{2н} + V_{3н} + V_{4н}) / 4 \quad (20)$$

або за середньгеометричним значенням:

при напрямку руху „вперед”

$$V_{с.г.в} = \sqrt[4]{V_{1в} V_{2в} V_{3в} V_{4в}}; \quad (21)$$

при напрямку руху „назад”

$$V_{с.г.н} = \sqrt[4]{V_{1н} V_{2н} V_{3н} V_{4н}}. \quad (22)$$

Перевищення значення швидкості окремого КМБ над середнім значенням швидкості вагону означає, що колісна пара буксує і тяговий двигун перевантажений: це викликає підвищення температури нагріву тягового двигуна і еквівалентно підвищеним витратам енергії.

Невідповідність швидкості окремого КМБ середній швидкості вагону означає, що колісна пара має юз, що також потребує витрат енергії, яку можна розрахувати за формулою

$$T = m V_p^2 / 2, \quad (23)$$

де m – маса тіла (частини вагону, яка припадає на один КМБ); V_p – різниця між середньою швидкістю для вагону і швидкістю окремого КМБ.

Пропонується до розгляду приклад можливого вибору варіантів КМБ вагону з колісних пар і тягових двигунів, які мають технічні ха-

рактистику з допущеними технічними нормами допусків .

Колісні пари з діаметром круга кочення коліс, мм:

1- 785 , **2-** 781 , **3-** 769 , **4-** 777.

Тягові двигуни з частотою обертання валу – праворуч / ліворуч,
об./хв:

1`- 1414/1360 , **2`-** 1360/1306 , **3`-** 1306/1306 , **4`-** 1414/1360.

Примітка: **1,2,3,4** – номери колісних пар, **1`,2`,3`,4`** – номери тягових двигунів; у дужках () визначається КМБ, де першим числом визначається номер колісної пари, другим – номер тягового двигуна; пара КМБ у дужках [] визначає візок [(□ - □), (□ - □)].

Перший варіант вибору КМБ:

[(1 - 1`), (2 - 2`)] - [(3 - 3`), (4 - 4`)]

Відносна різниця швидкісних характеристик КМБ (% %)

Перший візок Другий візок Між візками Середньоарифметичне

Вперед -8,1 Вперед - 5,2 Вперед - 9,5; 3,6 відносних різниць

Назад - 0,5 Назад - 9,4 Назад - 5,9; 3,4 швидкісних

характеристик КМБ - **5,7**

Оптимальний варіант вибору КМБ:

[(3 - 4`), (4 - 1`)] - [(2 - 2`), (1 - 3`)]

Відносна різниця швидкісних характеристик КМБ (% %)

Перший візок Другий візок Між візками Середньоарифметичне

Вперед -2,8 Вперед - 5,1 Вперед - 2,3; 2,4 відносних різниць

Назад - 5,1 Назад - 0,5 Назад - 2,5; 2,98 швидкісних

характеристик КМБ - **2,56**

Порівняння обох варіантів ілюструє позитивність заходів щодо вибору колісно-моторних блоків і відповідно забезпечує найкращі умови роботи колісних пар і тягових двигунів вагону метрополітену, тому доцільно в подальшому розширити дану методику підбору таких елементів рухомого складу електричного транспорту.

1. Пат. 14947А Україна В60L 11/04, В61С 15/08. Пристрій для управління струмами збудження паралельно з'єднаних тягових електродвигунів / В.Х.Далека, М.В.Хворост, В.В.Шиленко. № 96144148. Заявл. 04.11.96; опубл. 04.03.97.

2. Далека В.Ф., Хворост Н.В., Минеева Ю.В. К вопросу о неравномерности токораспределения между тяговыми электродвигателями // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.6. – К.: Техніка, 1996. – С.91-97.

3. Горобченко А.Н. Размещение электродвигателей под локомотивом с учетом их характеристик. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – №2. – С.69-72.

4. Далека В.Х., Хворост М.В. Оцінка ефективності системи зменшення нерівномірності струморозподілу на вагонах метрополітену // Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту: Міжвуз. зб. наук. праць. Вип.46. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – С.9-23.

5.Аракелов В.Е., Кремер А.И. Методические вопросы экономии энергоресурсов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.

6.Будниченко В.Б. Критерии оценки потерь электроэнергии в конструкции подвижного состава // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.23. – К.: Техніка, 2003. – С.193-197.

7.Далека В.Ф., Минеева Ю.В., Хворост Н.В. Требования к устройствам уменьшения неравномерности распределения мощностей между тяговыми электродвигателями // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.9. – К.: Техніка, 1997. – С.89-92.

8.Далека В.Ф., Храповицкий И.С., Минеева Ю.В., Хворост Н.В. Статистический анализ диаметров бандажей колесных пар вагонов метрополитена // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.12. – К.: Техніка, 1997. – С.94-95.

Отримано 05.09.2008

УДК 621.313.2

Б.Г.ЛЮБАРСКИЙ, канд. техн. наук, Е.С.РЯБОВ, Т.В.ГЛЕБОВА

Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков

М.Л.ГЛЕБОВА, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ

Рассматриваются вопросы математического моделирования тягового привода для подвижного состава на основе двигателей с поперечным полем.

На электроподвижном составе передовых в техническом отношении стран сейчас используются тяговые электроприводы на базе асинхронных двигателей [1-4] и рассматривается вопрос о создании подвижного состава с тяговыми синхронными двигателями одним из которых является двигатель с поперечным полем. Показатель удельной массы у последних на 60-70% лучше, чем у асинхронных. Основной проблемой при создании тягового привода такого типа является создание адекватной математической модели описывающей работу такого рода привода. В работах [5, 6] рассмотрена математическая модель тягового привода на основе двигателей с поперечным полем и модель магнитного поля такого двигателя позволяющая идентифицировать математическую модель.

Цель данной работы – провести математическое моделирование тягового привода на основе двигателя с поперечным полем .

На рис.1 представлена конструктивная схема тягового привода на основе двигателя с поперечным полем, а на рис.2 – принципиальная схема силовых цепей тягового электропривода.

Тяговый преобразователь состоит из двух однофазных автономных инверторов напряжения, соединенных параллельно по входу. Напряжение питания U_d регулируется с помощью импульсного прерыва-