

**УЧЕТ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

*Черный А.П., д.т.н., проф., Артеменко А. Н., ассист.*

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского  
39614, Украина, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

*E-mail: [saue@polytech.poltava.ua](mailto:saue@polytech.poltava.ua)*

У роботі розглянуті питання врахування нерівномірності навантаження системи тягового електропривода та запропонована математична модель автоматичного вирівнювання навантаження при несиметрії параметрів тягового електроприводу постійного струму з двигунами послідовного збудження.

**Ключові слова:** тяговий електропривод, вирівнювання навантаження, нерівномірність параметрів.

The problems of taking into account of the tractive electric drive system loading inequality have been considered in this work and the mathematical model of automatic grading of loading when the unsymmetry of tractive electric drive current parameters and motors of series excitation takes place has been suggested.

**Key words:** tractive electric drive, grading of loading, unsymmetry of parameters.

**Введение.** Эффективность работы рельсового транспорта во многом определяется техническим совершенством средств тяги - локомотивов, моторных вагонов, трамваев. Эти тяговые единицы подвижного состава железных дорог объединяет общий принцип функционирования: контактное фрикционное взаимодействие ведущего колеса, нагруженного силой веса и тяговым моментом, и рельсовой колеи в качестве направляющей путевой основы.

От процессов, происходящих в контакте взаимодействующих между собой колеса и рельса, зависит в целом эффективность и надежность тягового подвижного состава железных дорог.

На рис. 1 представлена диаграмма средней наработки на отказ тягового электропривода рельсового транспорта. Как видно из диаграммы, с каждым годом надежность привода уменьшается, что существенно влияет на экономическую эффективность использования подвижного состава железных дорог.

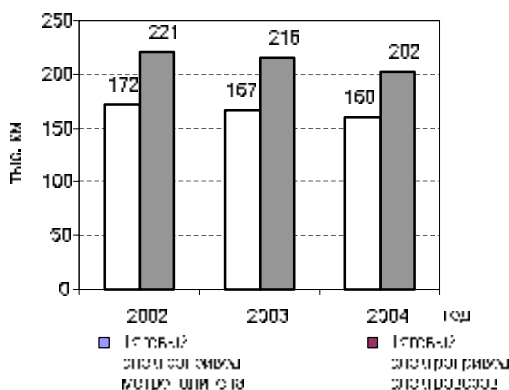


Рисунок 1 – Средняя наработка на отказ тягового электропривода

Парк используемых тяговых двигателей уже морально устарел и большинство электрических машин прошли ремонт. В подвижном составе рельсо-

вого транспорта используется двухдвигательный электропривод (рис. 2). Перспективные системы электропривода в настоящее время проектируются по схеме ШИП-Д с индивидуальным питанием якорных цепей двигателей.

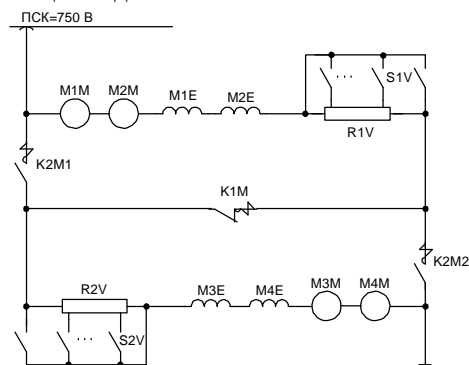


Рисунок 2 – Упрощенная принципиальная схема силовых электрических цепей вагонов метрополитена 81.714 и 81.717 при пуске

Известным является то, что отремонтированные и установленные на транспортное средство двигатели имеют взаимную параметрическую несимметрию: неравенство активных сопротивлений статора, индуктивностей якоря и обмотки возбуждения, магнитных потоков. Даже незначительная параметрическая несимметрия приводит к неравномерному распределению нагрузки между двигателями и появлению проскальзывания одной из колесных пар, что, в свою очередь, еще больше увеличивает неравномерность нагрузки. Современные системы управления этого фактора не учитывают.

**Цель работы.** Задачей исследования является определение неравномерности определения нагрузки двигателей постоянного тока последовательного возбуждения с жесткой связью валов тягового электропривода при их параметрической несимметрии.

**Материалы и результаты исследований.**

Уравнение двухдвигательного электропривода запишем в виде [1]:

$$w = \frac{b_1 w_{01} + b_2 w_{02}}{b_1 + b_2} - \frac{M_c}{b_1 + b_2}, \quad (1)$$

где  $b_{1(2)}$  - модуль жесткости механических характеристик 1(2)-го двигателей в точке нагрузки  $(M, \omega)$ ;  $M_c$  - момент сопротивления электропривода;  $w_{01(02)}$  - скорость идеального холостого хода, определяемая как касательная к механической характеристике двигателя в точке нагрузки (рис.3).

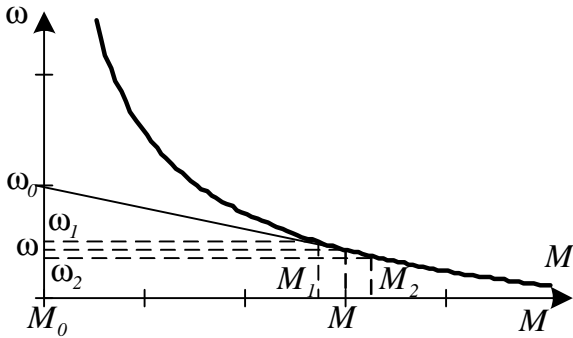


Рисунок 3 – Механическая характеристика тягового двигателя постоянного тока

Определим  $w_0$  из уравнения прямой

$w_0 = w_1 + \frac{w_2 - w_1}{M_2 - M_1} (M_0 - M_1)$ . Примем, что в окрестности точки нагрузки  $(M, \omega)$  характеристика линейна, и  $w_1 = w - Dw$ ;  $w_2 = w + Dw$ ;  $M_1 = M - DM$ ;  $M_2 = M + DM$ . Тогда:

$$w_0 = \frac{wDM - MDw}{DM}, \quad (2)$$

или

$$w_0 = w - \frac{1}{b} M. \quad (3)$$

Жесткость механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с учетом нелинейности механической характеристики  $b = \frac{\partial M}{\partial w}$ . Записав уравнение механической

характеристики в виде  $w = \frac{U}{\sqrt{kaM}} - \frac{R}{ka}$ , где  $k$  - конструктивный коэффициент;  $a$  - коэффициент наклона касательной к кривой намагничивания;  $U$  - напряжение на двигателях, и дифференцируя получим

$$\left| \frac{\partial M}{\partial w} \right| = \frac{k^2 U^2}{(wka + R)^3}. \quad (4)$$

Из уравнения (1) распределение нагрузки между двигателями:

$$\begin{cases} M_1 = b_1 \left( w_{01} - w + \frac{M_c}{b_1 + b_2} \right); \\ M_2 = b_2 \left( w_{02} - w + \frac{M_c}{b_1 + b_2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя (4) в (3) и (5), получим:

$$M_{1(2)} = \frac{k_{1(2)}^2 U^2}{(wk_{1(2)} a_{1(2)} + R_{1(2)})^3} \times \left[ 2w - \frac{M_c}{\left( \frac{k_1^2 U^2}{(wk_1 a_1 + R_1)^3} + \frac{k_2^2 U^2}{(wk_2 a_2 + R_2)^3} \right)} \right] \quad (6)$$

Полученное выражение позволяет рассчитать неравномерность нагрузки при параметрической несимметрии двигателей постоянного тока последовательного возбуждения тягового электропривода: неравенстве сопротивлений якоря  $R_1 \neq R_2$ ; неравенстве конструктивных коэффициентов  $k_1 \neq k_2$ ; неравенстве коэффициентов наклона касательной к кривой намагничивания  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ . Уравнение учитывает нелинейность механической характеристики двигателей. Достаточно просто может быть учтено изменение момента сопротивления привода при проскальзывании колеса по рельсу.

Система тягового электропривода широко применяется в рельсовом транспорте, в том числе в метро. Рассмотрим работу многодвигательного тягового электропривода на примере вагона метрополитена.

Многодвигательный взаимосвязанный электропривод вагона, который включает в себя 4 ДПТ, является сложной системой, структура которой, в зависимости от режима движения, изменяется. При пуске привода тяговый электропривод включен по схеме последовательного соединения двигателей (рис. 4, а), в маршевом режиме схема переключается таким образом, что последовательно включены 2 двигателя, а эти группы включены параллельно (рис.4, б).

Однако, даже при параллельном включении питающее напряжение является единым для всех двигателей, поэтому единственным способом выравнивания нагрузки между двигателями является способ воздействия на магнитный поток. Это является наиболее приемлемым, так как по условию управления движением предусматривается регулирование магнитного потока для обеспечения работы привода во второй зоне. Для этого на обмотки возбуждения включается управляемый ключ – ШИП.

Пример такой схемы показан на рис. 5.

В зависимости от построения схемы электропривода будут различаться и их математические модели.

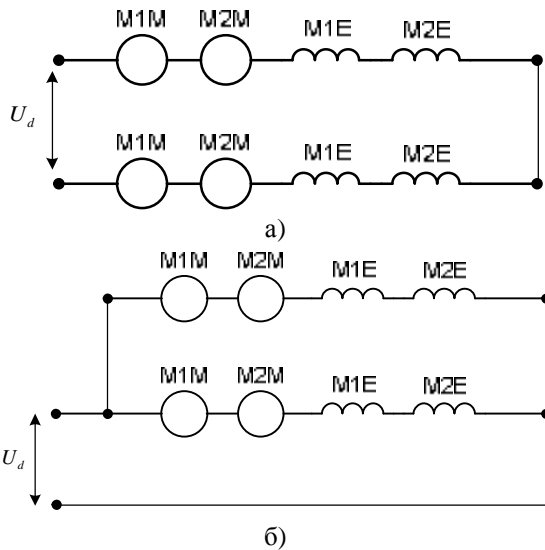


Рисунок 4 – Структурные схемы соединения двигателей электропривода вагона: а) – последовательная; б) – последовательно параллельная

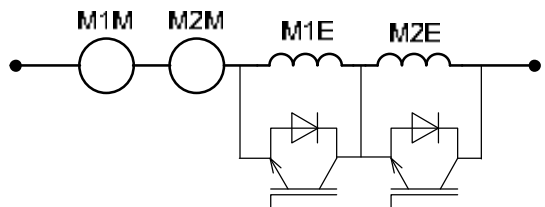


Рисунок 5 – Пример принципиальной схемы с управлением магнитным потоком ДПТ последовательного возбуждения

При последовательном соединении двигателей:

$$L_S \frac{dI}{dt} = U_d - IR_S - w(kf_1(I) + kf_2(I) + kf_3(I) + kf_4(I));$$

$$J_S \frac{dw}{dt} = I(kf_1(I) + kf_2(I) + kf_3(I) + kf_4(I)) - M_c(w)$$

где

$$L_S = L_{я1} + L_{я2} + L_{я3} + L_{я4} + L_{об1} + L_{об2} + L_{об3} + L_{об4}$$

- суммарная индуктивность якорной цепи;  $L_{я}$ ,  $L_{об}$  - индуктивность якоря и обмотки возбуждения;

$$R_S = R_{я1} + R_{я2} + R_{я3} + R_{я4} + R_{об1} + R_{об2} + R_{об3} + R_{об4}$$

- суммарное активное сопротивление якорной цепи;  $R_{я}$ ,  $R_{об}$  - активное сопротивление якоря и обмотки возбуждения;  $J_S$  - суммарный момент инерции привода, включая момент инерции вагона;  $kf_i(I)$  - зависимость магнитного потока  $i$ -го двигателя от тока якоря.

При последовательно параллельном соединении двигателей:

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} = 0.5U_d - I_1 R_1 - w(kf_1(I_1) + kf_2(I_1));$$

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} = 0.5U_d - I_2 R_2 - w(kf_3(I_2) + kf_4(I_2));$$

$$J_S \frac{dw}{dt} = I_1(kf_1(I_1) + kf_2(I_1)) + I_2(kf_3(I_2) + kf_4(I_2)) - M_c(w)$$

где  $L_1, R_1$  - суммарная индуктивность и активное сопротивление 1-й параллельной ветви;  $I_1$  - ток 1-й параллельной ветви;  $L_2, R_2$  - суммарная индуктивность и активное сопротивление 2-й параллельной ветви;  $I_2$  - ток 2-й параллельной ветви;  $M_c(w)$  - момент сопротивления, зависящий от скорости движения вагона.

Для упрощения расчетов динамических режимов при параметрической несимметрии двигателей приведем принципиальную схему (рис. 4) к виду (рис. 6).

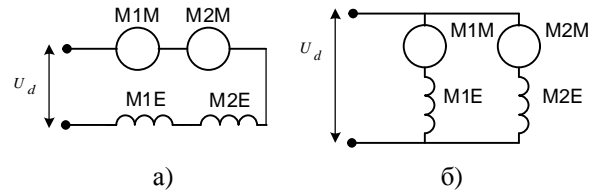


Рисунок 6 – Упрощенные структурные схемы соединения двигателей электропривода вагона: а) – последовательная; б) – параллельная

С учетом сделанных упрощений, функциональная схема автоматического выравнивания нагрузки при параметрической несимметрии с воздействием на магнитный поток при последовательном соединении якорных цепей двигателей будет иметь вид, показанный на рис. 8, а при параллельном – на рис. 7.

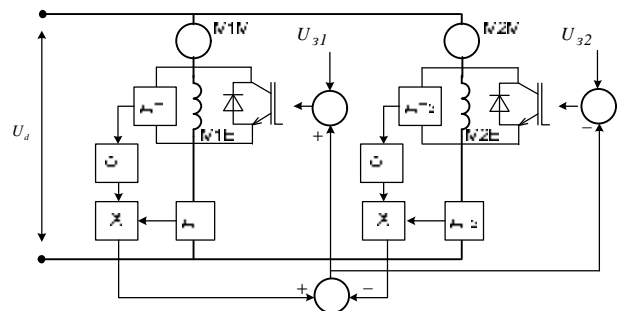


Рисунок 7 – Схема автоматического выравнивания нагрузки при параметрической несимметрии с воздействием на магнитный поток при параллельном соединении якорных цепей двигателей

Исследование автоматического выравнивания нагрузки при параметрической несимметрии приведены на рис. 9-10. Математическое моделирование проводилось для схемы на рис. 6, а.

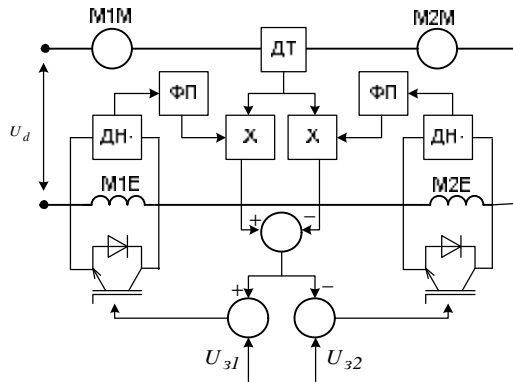


Рисунок 8 – Схема автоматического выравнивания нагрузки при параметрической несимметрии с воздействием на магнитный поток при последовательном соединении якорных цепей двигателей

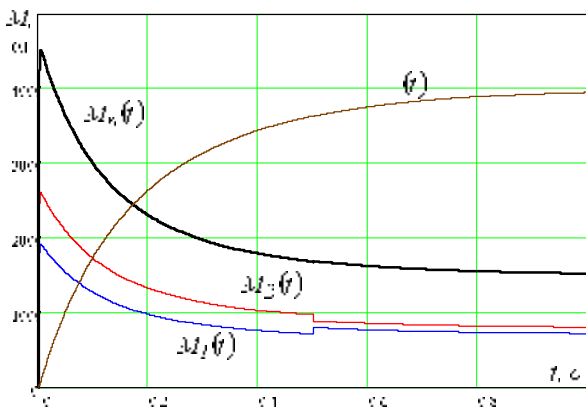


Рисунок 9 – Выравнивание нагрузки при неравенстве параметров обмоток возбуждения при последовательном включении двигателей

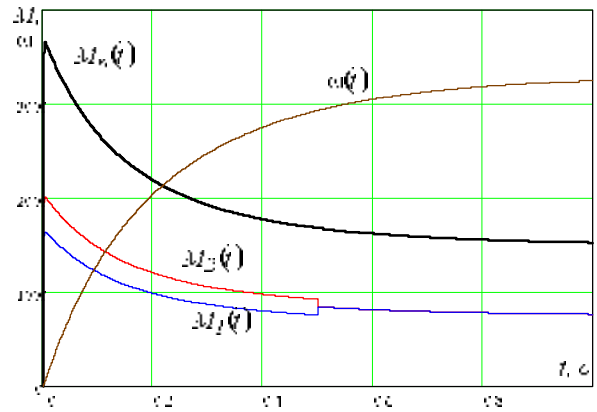


Рисунок 10 – Выравнивание нагрузки при неравенстве сопротивлений якорей двигателей при их последовательном включении

**Выводы.** Предложенная система выравнивания нагрузки наиболее эффективно работает при неравенстве сопротивлений якорей двигателей, чем при неравенстве параметров обмоток возбуждения.

Выполненные исследования положены в основу анализа работы системы колесо-рельс и выработки рекомендаций для снижения аварийности тягового электропривода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772с.
2. Голубев О.Л. Сцепление колеса с рельсом: Монография. – К.: Фирма «ВИПОЛ», 1993. – 448с.
3. Электрические железные дороги: учебник / под ред. проф. В.П. Феоктистова, проф. Ю.Е. Провирова; Моск. ун-т путей сообщения; Самарская гос. акад. путей сообщения. – Самара: СамГАПС, 2006. – 312с.

Стаття надійшла 06.09.2008 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Кореньковою Т.В.