

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА: ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

Пересада С.М., Бовкунович В.С.

Национальный технический университет Украины "КПИ"

1. Введение

Современные тяговые электроприводы рельсового транспорта, как правило, выполнены на основе асинхронных короткозамкнутых двигателей (АД) [1]. При этом общепринятая топология силовых цепей электропривода предполагает питание нескольких тяговых АД от одного инвертора [2]–[4]. Такая структура позволяет существенно снизить стоимость силовой электроники, однако приводит к тому, что электромеханическая система не является полностью управляемой, в связи с чем независимое управление моментом приводных двигателей невозможно. Задача управления усложняется существенно нелинейным характером формирования момента в АД и сложным нелинейным характером динамики кинематической пары колесо–рельса (К–Р), которые являются причиной возникновения в электромеханической системе нелинейных фрикционных колебаний. Несмотря на важные результаты по разработке методов подавления фрикционных колебаний [5], [6], решение этой проблемы существует лишь для отдельных структур электромеханических систем из-за затруднительности получения обобщающих результатов в связи со сложностью и нестационарностью динамических процессов при фрикционном характере нагрузки.

По существующей классификации рассматриваемые электромеханические объекты управления относятся к многомерным нелинейным с частично-измеряемым вектором состояния, которые подвержены действию неизмеряемых параметрических и координатных возмущений. Вместе с тем проблема управления традиционно формулируется в условиях существенных упрощающих допущений, основными из которых являются [7]: пренебрежение нелинейностями механической части, а также динамикой формирования момента приводных двигателей, неучет особенностей многодвигательного электропривода с общим силовым преобразователем. В такой постановке задача состоит в управлении типовым линейным объектом, для которого возможно использование стандартных решений, например, систем с подчиненным регулированием параметров.

Лишь в некоторых исследованиях последних лет рассматривается задача управления электромеханическими объектами рельсового транспорта (см. [8], а также приведенный список литературы) с учетом основных нелинейностей. При этом авторы в основном ограничиваются вопросами разработки структур электромеханических объектов, а также анализом динамических процессов при использовании стандартных методов управления в линейных системах.

Целью настоящего исследования является разработка математического описания стандартного двухдвигательного тягового модуля с АД, адекватно учитывающего основные нелинейности его электрической и механической частей, а также формализация задач управления.

2. Динамическая модель тягового модуля

Типовая структура тягового модуля включает два приводных АД, расположенных на одной тележке и получающих питание от общего инвертора напряжения. Упрощенная схематизация тяговой тележки и функциональная схема электромеханического объекта управления представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

Каждое из двух колес тележки приводится во вращение своим приводным двигателем через понижающий редуктор. В силу контактного закона кинематические пары создают тяговые усилия F_1 и F_2 , прикладываемые к тележке, к которой также приложено усилие сопротивления движению F_c . Оба приводных двигателя АД1 и АД2 управляются стандартным транзисторным преобразователем с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), в звене постоянного тока которого установлен фильтр. При использовании типовых методов формирования векторной ШИМ в функции напряжения звена постоянного тока, преобразователь частоты с достаточной степенью точности может считаться безинерционным усилительным звеном. При этом необходимо учитывать, что в силу свойств контактной сети напряжение источника постоянного напряжения не является постоянным, как в сети постоянного тока, так и полученное путем выпрямления в случае контактной сети переменного тока. Конфигурация сглаживающего фильтра определяется типом контактной сети.

Направление движения

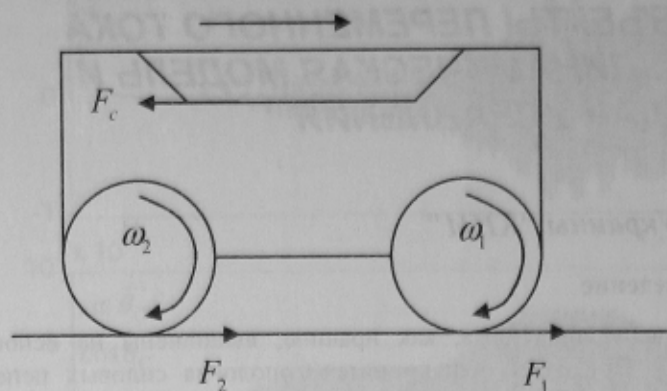


Рис. 1. Упрощенная схематизация тяговой тележки

Электрическая подсистема электрохимического объекта включает электрические подсистемы АД1 и АД2, входом которых является двухмерный вектор напряжения, формируемый инвертором и приложенный к статорным обмоткам двигателей, а выходом электромагнитные моменты M_1 и M_2 , приложенные к осям колес тележки.

Ориентируясь на применение векторных методов управления асинхронными двигателями, их динамическую модель целесообразно представить в синхронной системе координат (d-q), вращающейся с угловой скоростью ω_0 . В условиях симметричности питания, а также при равенстве параметров динамическая модель каждого из двигателей имеет вид [9]

$$M_i = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2di} i_{qi} - \psi_{2qi} i_{di})$$

$$\dot{i}_{di} = -\gamma i_{di} + \omega_0 i_{qi} + \alpha \beta \psi_{2di} + \beta \omega_1 p_n \psi_{2qi} + \frac{1}{\sigma} u_{1d}$$

$$\dot{i}_{qi} = -\gamma i_{qi} - \omega_0 i_{di} + \alpha \beta \psi_{2qi} - \beta \omega_1 p_n \psi_{2di} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \quad (1)$$

$$\dot{\psi}_{2di} = -\alpha \psi_{2di} + (\omega_0 - \omega_1 p_n) \psi_{2qi} + \alpha L_m i_{di}$$

$$\dot{\psi}_{2qi} = -\alpha \psi_{2qi} - (\omega_0 - \omega_1 p_n) \psi_{2di} + \alpha L_m i_{qi}$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0, i = 1, 2,$$

где: $(i_{1d}, i_{1q}), (u_{1d}, u_{1q}), (\psi_{2d}, \psi_{2q})$ – компоненты векторов тока статора, напряжения статора, потокоцепления ротора; M – электромагнитный момент, ω – угловая скорость, ε_0 – угловое положение системы координат (d-q) относительно неподвижной системы координат статора, p_n – число пар полюсов. Положительные константы в (1), задаваемые электрическими параметрами АД, определены стандартным образом [9]. Переменные в системе координат (d-q) связаны с переменными в системе координат статора (a-b) преобразованием

$$\begin{aligned} x^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0} x^{(a-b)} \\ x^{(a-b)} &= e^{J\varepsilon_0} x^{(d-q)}, \quad e^{-J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где x – двухмерный вектор напряжений, токов или потокоцеплений.

Механическая подсистема электрохимического объекта включает динамику приводных колес и собственно динамику тележки. Уравнение динамики каждой приводной оси имеет вид

$$\dot{\omega}_i = J_i^{-1} (M_i - M_{ci}), i = 1, 2, \quad (3)$$

где ω_i – угловая скорость колеса, M_i – движущий момент, J_i – полный момент инерции, M_{ci} – момент нагрузки.

Динамическое поведение тележки описывается следующим уравнением движения:

$$\dot{v} = m^{-1} (F_1 + F_2 - F_c), \quad (4)$$

где m, v – масса и линейная скорость тележки, движущие силы колес F_1 и F_2 , а также сила сопротивления F_c показаны на рис 1.

Уравнения (3) и (4) связаны выражениями

$$M_{ci} = r F_i, \quad (5)$$

$$v_{\omega i} = r \omega_i,$$

где r – радиус колеса, v_{ω} – линейная скорость точки контакта колеса и рельса.

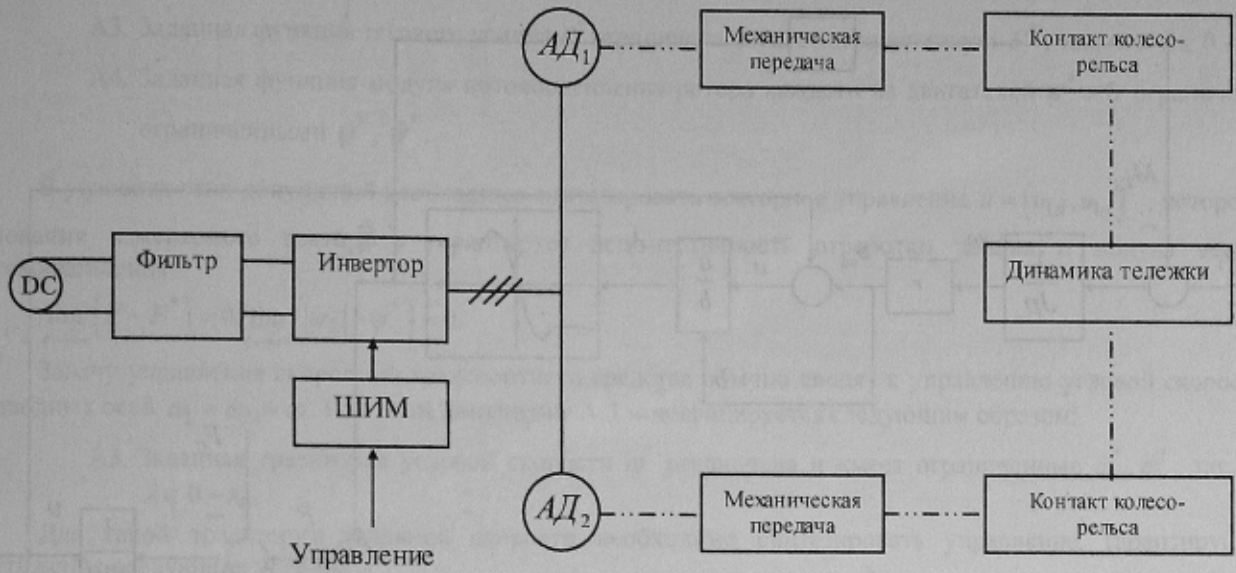


Рисунок 2 – Функциональная схема электромеханического объекта управления

Тяговые усилия колес F_i определяются в соответствии с контактным законом [8], [10], [11]

$$F_i = \varphi_i(\lambda_i, t), \quad (6)$$

где λ_i – скольжение, рассчитываемое по формуле

$$\lambda_i = \frac{v_{\omega i} - v}{v_{\omega i}}. \quad (7)$$

Аппроксимация функции $\varphi(\lambda, t)$ при пренебрежении гистерезисом представлена на рис. 3. На графиках

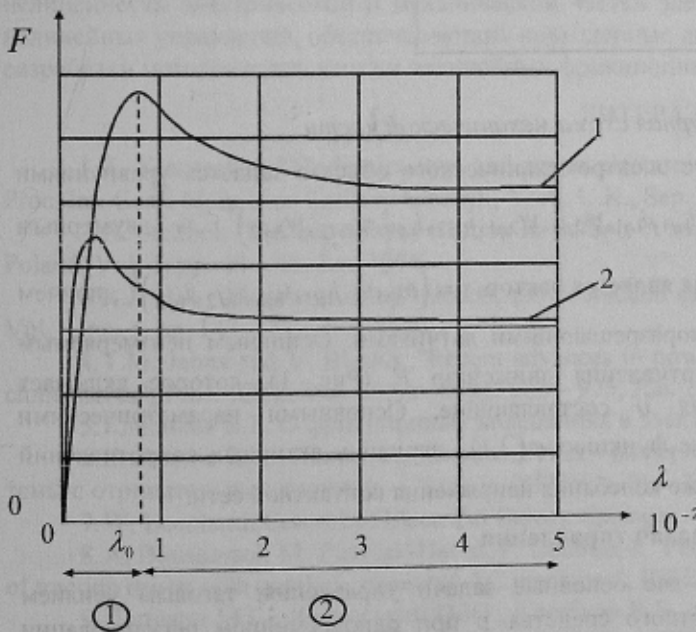


Рисунок 3 – Вид функции сцепления $\varphi(\lambda)$, 1 – максимальное сцепление, 2 – минимальное сцепление

функций сцепления выделяют две зоны: первая псевдоскольжения при $\lambda \in (0 - \lambda_0)$, когда большая часть усилия передается от колеса к рельсу, и вторая при $\lambda > \lambda_0$ – зона скольжения, заканчивающаяся участком полного проскальзывания. Зависимость $\varphi(\lambda, t)$ характеризуется существенной нестационарностью в зависимости от величины нормального усилия, прикладываемого к контактной точке (К-Р) и определяемого весом тележки, состоянием поверхностей контакта, температуры и других факторов. Причем коэффициенты сцепления для каждой из приводных осей могут отличаться даже для одной тележки, поэтому функции $\varphi(\lambda, t)$ для каждого из электроприводов могут быть разными.

Структурная схема механической части электромеханического объекта, соответствующая уравнениям (3)–(7), приведена на рис. 4. Отметим, что, если исключить многодвигательность, то при работе в первой зоне, рис. 3, структура механической части обладает некоторым подобием с двухмассовыми электромеханическими объектами.

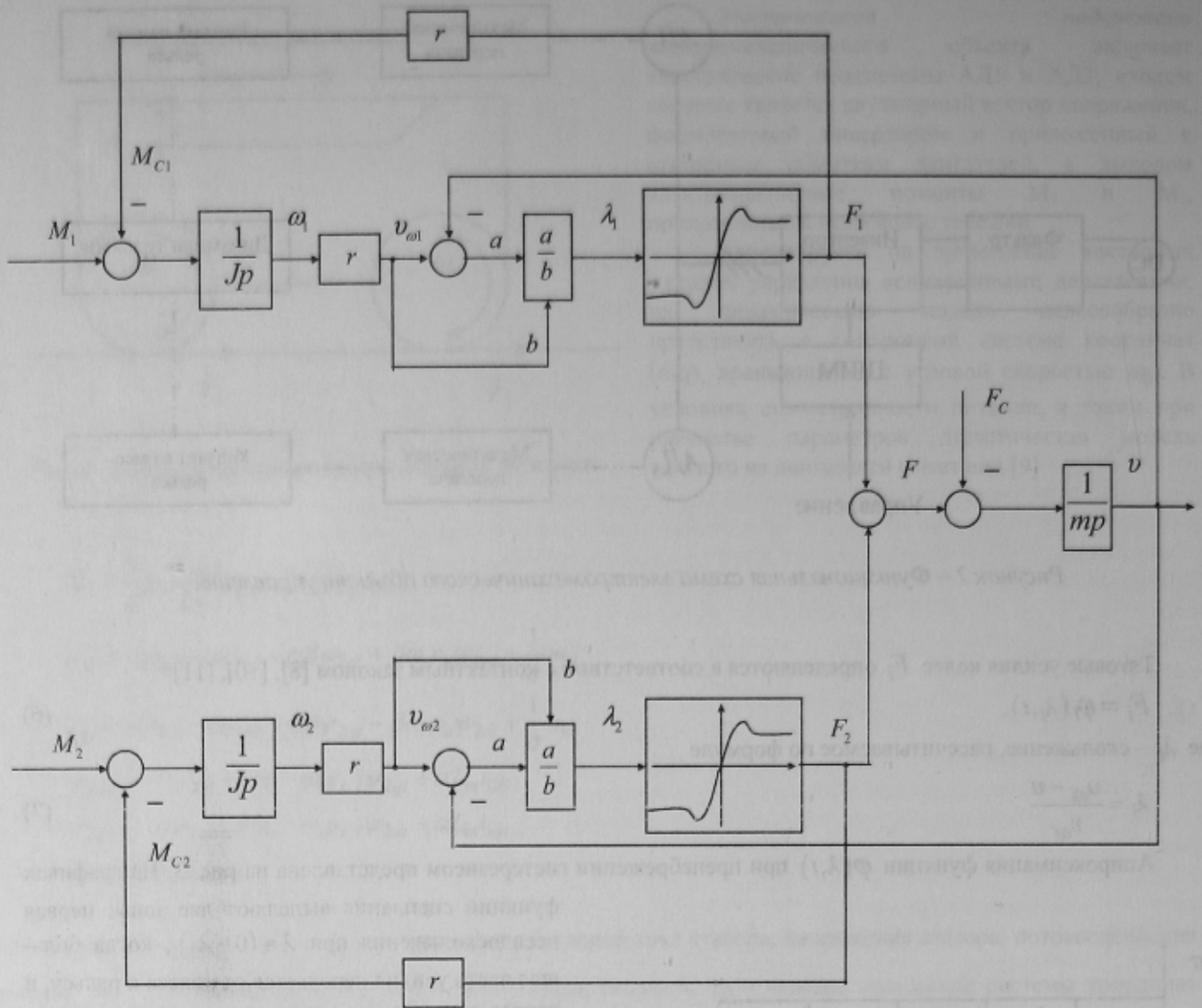


Рисунок 4 – Структурная схема механической части

Полная динамическая модель рассматриваемого электромеханического объекта задается уравнениями (1), (3)–(5) с вектором состояния $x = (v, \omega_1, \omega_2, \dot{\psi}_{d1}, \dot{\psi}_{q1}, \psi_{2d1}, \psi_{2q1}, \dot{\psi}_{d2}, \dot{\psi}_{q2}, \psi_{2d2}, \psi_{2q2})^T$ и двумерным управлением $u = (u_{1d}, u_{1q})^T$. Доступным для измерения является вектор $y = (\omega_1, \omega_2, \dot{\psi}_{d1}, \dot{\psi}_{q1}, \dot{\psi}_{d2}, \dot{\psi}_{q2})^T$, причем угловые скорости ω_1 и ω_2 обычно измеряются низкоразрешающими датчиками. Основным неизмеряемым координатным возмущением является усилие сопротивления движению F_c (Рис. 1), которое включает постоянную и зависящую от скорости движения v составляющие. Основными параметрическими возмущениями являются параметры, характеризующие функцию $\varphi(\lambda, t)$, вариации активных сопротивлений обмоток статора и ротора приводных двигателей, а также колебания напряжения контактной сети.

3. Постановка задач управления

Для локомотивов и трамваев рассматривают две основные задачи управления: тяговым усилием $F = F_1 + F_2$, а также линейной скоростью транспортного средства v при одновременном регулировании модуля потокосцепления ротора каждого из двигателей $|\psi_2| = (\psi_{2d}^2 + \psi_{2q}^2)^{\frac{1}{2}}$. При этом для исключения режимов проскальзывания управление каждым из двигателей должно осуществляться на участке псевдоскольжения $\lambda \in (0 - \lambda_0)$ функции $\varphi(\lambda, t)$. Сформулируем следующую задачу управления тяговым усилием. Пусть для электромеханического объекта (1)–(6) выполняются следующие допущения:

- A1. Параметры модели известны и постоянны, каналы формирования усилий F_1 и F_2 идентичны.
- A2. Возмущение F_c неизвестно, но постоянно (медленно изменяющееся).

A3. Заданная функция тягового усилия F^* ограничена и имеет ограниченную \dot{F}^* , так, что $\lambda \in 0 - \lambda_0$.

A4. Заданная функция модуля потокосцепления ротора каждого из двигателей $\psi^* > 0$ ограничена с ограниченными $\dot{\psi}^*$, $\ddot{\psi}^*$.

В условиях этих допущений необходимо синтезировать векторное управление $u = (u_{1d}, u_{1q})^T$, которое на основании измеряемого вектора y гарантирует асимптотичность отработки усилия и модуля вектора потокосцепления:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (F - F^*) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} (|\psi_2| - \psi^*) = 0. \quad (8)$$

Задачу управления скоростью транспортного средства обычно сводят к управлению угловой скоростью приводных осей $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. При этом допущение A.3 модифицируется следующим образом:

A3. Заданная траектория угловой скорости ω^* ограничена и имеет ограниченные $\dot{\omega}^*$, $\ddot{\omega}^*$, так, что $\lambda \in 0 - \lambda_0$.

Для такой траектории заданной скорости необходимо синтезировать управление, гарантирующее достижение следующих условий:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\omega - \omega^*) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} (|\psi_2| - \psi^*) = 0. \quad (9)$$

Дополнительными требованиями к управлению являются:

O.1. Грубость в отношении параметрических возмущений, в том числе вариаций параметров функции $\varphi(\lambda, t)$.

O.2. При возникновении режимов $\lambda > \lambda_0$, когда возможно возникновение нелинейных фрикционных колебаний, обеспечивать восстановление условия псевдоскольжения $\lambda < \lambda_0$.

Насколько известно авторам задача управления в рассмотренных постановках ранее не решалась.

4. Заключение

Разработана математическая модель двухдвигательной тяговой тележки с кинематической парой колесо-рельса, построенной на основе асинхронных тяговых электродвигателей. Модель учитывает основные нелинейности электрической и механической частей электромеханического объекта и пригодна для синтеза нелинейных управлений, обеспечивающих повышенные динамические свойства транспортных средств, а также разработки методов компенсации нелинейных фрикционных колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Klausecker, "Modern control and power electronics for the ac drives of German high-speed train ICE", in Proc. Int. Conf. Main Line Railway Electrification, York, U.K., Sep. 1989, pp. 53 - 57.
2. A. Steimel, "Electric railway traction in Europe. A survey of the state-of-the-art", in Proc. IEEE ISIE, Warsaw, Poland, Vol. 1, pp. 40 - 48, Jun. 1996.
3. R.J. Hill, "Electric railway traction, part2, traction drives with three-phase induction motors", Power Eng. J., Vol. 8, no. 3, pp. 143 - 152, Jun. 1994.
4. T.M. Jahns and V. Blasko, "Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives", Proc. IEEE, Vol. 89, no. 6, pp. 963 - 975, Jun. 2001.
5. Клепиков В.Б. О фрикционных колебаниях в электроприводах // Электричество, №4, 1986, с. 59 - 62.
6. Клепиков В.Б., Палис Ф., Клепиков А.В. Экспериментальные исследования электромеханической системы с отрицательным трением. - Харьков: ХГПУ, с. 26 - 32, 1999.
7. W. Leonhard, Control of Electrical Drives. Springer - Verlag, Berlin: 1996.
8. A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, P. Delarue, R. Pena-Eguiluz, P. Vidal, and X. Kestelyn, "Weighted control of traction drives with parallel-connected AC machines", IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol. 53, no.6, pp. 1799 - 1806.
9. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б., и др. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. Посібник. - К.: Либідь, 2005. - 680с.
10. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. - М.: Транспорт. 1965. - 267с.
11. Минов Д.К. Механическая часть электрического подвижного состава. - М.: Госэнергоиздат. 1959. - 382с.