

ПРОЦЕСС БОКСОВАНИЯ ЧЕТЫРЕХОСНОГО МАНЕВРОВОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Для четырехосного маневрового электровоза выполнено математическое описание процесса боксования колесных пар в случае применения системы электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД). Актуальность работы заключается в возможности использования компьютерной модели при разработке и исследовании процессов работы асинхронных двигателей для тягового электропривода электровоза в различных режимах работы. Целью статьи является проведение исследований переходных процессов боксования на динамической компьютерной модели тягового асинхронного электропривода по системе ПЧ–АД для четырехосного электровоза. Используются методы математического моделирования в среде Matlab Simulink, основные положения физики, теоретической механики, теории электропривода, электрических машин, теории систем управления электроприводов, а также динамическая компьютерная модель асинхронного электропривода. За основу при создании модели взят промышленный маневровый электровоз НПМ2, разработанный Новочеркасским электровозостроительным заводом специально для применения на производственной площадке ПАО «ММК». Разработанная компьютерная модель электропривода настроена на конкретные параметры тяговых электродвигателей, позволяет рассчитывать переходные процессы в системе ПЧ–АД с учетом усилия тяги в сцепке и боксования. В статье дано краткое описание процессов боксования колесных пар, описаны основные типы этих процессов по условиям возникновения, разработаны дифференциальные уравнения движения при боксовании и структурные схемы математических моделей, учитывающих работу тягового электропривода с учетом усилия тяги в сцепке и различных систем регулирования и боксования четырехосного электровоза, проведена оценка переходных процессов при выбранных зазорах сцепных устройств по всей длине поезда, получены условия устойчивого боксования, сделаны выводы о целесообразности внедрения в систему автоматического управления электроприводов локомотива датчика линейной скорости.

Ключевые слова: четырехосный маневровый электровоз, боксование, колесная пара, тяговый электропривод, сила тяги, проскальзывание, сила сцепления, система «колесо-рельс», преобразователь частоты, асинхронный двигатель, компьютерная модель, системы регулирования

ВВЕДЕНИЕ

Маневровые локомотивы в логистических системах промышленных предприятий занимают важное место: без железнодорожных перевозок практически невозможно доставлять сырье, полуфабрикаты и готовую продукцию в требуемых объемах – железнодорожное сообщение в таких случаях является оптимальным для обеспечения заданных требований к качеству перевозок. Несмотря на кажущуюся очевидную простоту, качественные параметры управляемого движения поезда по железнодорожным путям связаны с физикой силы тяги локомотивов [1], реализуемой в соответствии с заданными тяговыми характеристиками [2], что в целом является серьезной научно-технической задачей.

В связи с несовершенством рельсовых путей [3], влиянием условий окружающей среды, перераспределением моментов на колесных парах локомотива при старте поезда и наличием других возмущающих воздействий [4–6], машинисты современных маневровых локомотивов при своей работе сталкиваются с явлением боксования колесных пар [7], представляющим серьезную проблему и повышающим общие риски эксплуатации железнодорожного транспорта.

Данная проблема не обошла стороной и промышленный маневровый электровоз НПМ2 [8, 9], разработанный Новочеркасским электровозостроительным заводом специально для применения на производ-

ственной площадке ПАО «ММК». На электровозе НПМ2 установлены регулируемые тяговые электроприводы переменного тока, выполненные по системе ПЧ–АД [10] с системой автоматического управления на основе микропроцессорных контроллеров [11], позволяющей в перспективе снижать вероятность возникновения, а также осуществлять эффективную компенсацию боксования.

Коррекция возможна за счет внедрения алгоритмов, сформированных на базе результатов исследования процесса боксования в системе «колесо-рельс» [7, 12] для локомотива с тяговым электроприводом на динамической компьютерной модели [13]. За основу для динамической компьютерной модели были взяты материалы предыдущих исследований, где для маневрового электровоза разработана по методам теории электрических машин, теории электропривода и систем управления электроприводов в среде Matlab Simulink достоверная динамическая компьютерная модель `adktanpc.mdl` по системе «транзисторный автономный инвертор напряжения – трехфазный тяговый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» [14–16].

Целью работы является математическое описание механических особенностей работы четырехосного локомотива с учетом усилия тяги в сцепке, процесса боксования и проведение исследований переходных процессов боксования на динамической компьютерной модели тягового асинхронного электропривода по системе ПЧ–АД [17] с различными системами регулирования [18].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачи для достижения поставленной цели:

1. Математическое описание давления колесных пар с учетом силы тяги локомотива.
2. Корректное описание изменения угловых скоростей колесных пар и линейной скорости вагонов в процессе буксования.
3. Разработка математической и компьютерной модели механической и электрической части электропривода с учетом изменения угловых скоростей колесных пар и линейной скорости вагонов при буксовании.
4. Исследование работы систем скалярного управления ПЧ-АД на модели при буксовании.

ПРОЦЕСС БУКСОВАНИЯ

Буксование может происходить как при трогании поезда с места, так и в движении. После срыва в буксование коэффициент трения скольжения между колесом и рельсом резко уменьшается, и самопроизвольно буксование прекратиться уже не может. Для предотвращения буксования используют модификаторы трения (например, подача песка в зону буксования) и ручную или автоматическую регулировку тягового момента или скорости.

Буксование имеет несколько видов [4, 7, 12, 13]:

1. Буксование колесных пар на поворотах.
2. Прерывистое буксование из-за колебаний кузова и тележек локомотива при движении.
3. Буксование всех колесных пар локомотива при резком пуске и езде на подъем или спуск.
4. Буксование отдельных колесных пар при пуске и подъеме поезда из-за неравномерного давления колесных пар на рельсы.

Буксование 1-го типа зависит от радиуса поворота и скорости поезда и на него нельзя воздействовать через систему регулирования, причем в буксовании всегда участвует внешнее колесо по радиусу поворота. Буксование 2-го вида носит случайный и колебательный характер, уменьшение которого возможно с увеличением устойчивости поезда. Буксование 3-го вида возможно при движении электровоза на холостом ходу или при существенном превышении тягового усилия. В статье выполнено исследование процесса буксования 4-го вида.

АНАЛИЗ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Процесс буксования имеет сложную природу. Кратко проанализируем наиболее характерные статьи по этому вопросу. В [3, 4, 7, 12, 13] сделаны попытки объяснения процесса на уровне вещества и приведены структурные схемы для описания буксования между колесами на поворотах для тяговых электродвигателей (ТЭД). Здесь же приведены зависимости сил сцепления колеса от разности скоростей буксования. В [4] представлены укрупненные блочные схемы для выявления буксования, его ограничения между колесными парами для ТЭД переменного тока. В работах Самме Г.В. [7, 12] раскрыто состояние проблемы, приведены новые зависимости коэффициента сцепления от скорости скольжения, имеющие до двух максимумов. Даны предложения по положительному использованию буксования.

ДАВЛЕНИЕ КОЛЕСНЫХ ПАР ОТ СИЛЫ ТЯГИ ЛОКОМОТИВА

Максимальное тяговое усилие, передаваемое через колесную пару, зависит от качества поверхностей колеса и рельса, величины давления колеса на рельс и скорости движения электровоза. Четырехосный электровоз имеет две тележки с опорно-осевой подвеской на подшипниках качения, поэтому в кинематической схеме локомотива (рис. 1), описывающей усилия, возникающие при движении локомотива с постоянной скоростью V_L , реакция рельсов от давления колес в подшипниках отмечена усилиями F_{12} и F_{34} , приложенных на расстояниях l_L от центра масс. Каждая колесная пара формирует тяговое усилие F_{Kl} . Реакцией от суммарного тягового усилия является усилие сопротивления от вагонов F_{CV} , прикладываемое на высоте сцепки h_L .

В соответствии с обозначениями рис. 1 для установившегося движения составлена система уравнений:

$$\begin{cases} \sum M_A = 0; -F_{12}l_L + F_{34}l_L - F_V h_L + \frac{F_V D_K}{2} = 0; \\ \sum F_Y = 0; F_{34} + F_{12} - P_L = 0; \\ \sum F_X = 0; -F_V + F_{K1} + F_{K2} + F_{K3} + F_{K4} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где F_{12} и F_{34} – реакция рельсов от давления колес в подшипниках; l_L – расстояние от центра масс, м; F_V – усилие на сцепке, Н; h_L – высота оси сцепного устройства, м; D_K – диаметр колеса, м; P_L – вес локомотива, кг; F_{Kl} – тянущие усилия колесных пар, Н.

Решение системы уравнений (1):

$$\begin{cases} F_V = F_{K1} + F_{K2} + F_{K3} + F_{K4}; \\ F_{12} = \frac{P_L}{2} - \frac{F_V(h_L - R_K)}{2l_L}; \\ F_{34} = \frac{P_L}{2} + \frac{F_V(h_L - R_K)}{2R_K}. \end{cases} \quad (2)$$

где R_K – радиус колеса.

В соответствии с уравнениями (2) при постоянной скорости поезда усилие от вагонов складывается из тянущих усилий колес F_{Kl} , а давление колес на рельсы зависит от веса локомотива и тянущего усилия от вагонов, причем давление передней пары уменьшается (разгрузка), а давление задней пары увеличивается (перегрузка). Это приводит к разным режимам работы колесных пар, так как при отсутствии буксования максимальное тянущее усилие не должно превышать давление колеса на рельс, умноженное на коэффициент сцепления Ψ [4].

Задача по описанию условий буксования решается для электровоза НПМ2М, основные характеристики которого [8, 9] приведены в табл. 1.

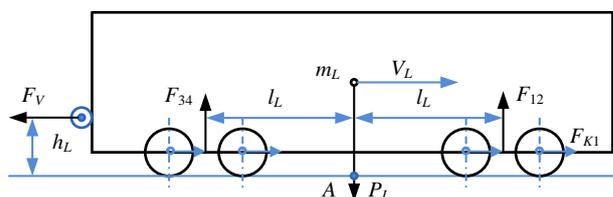


Рис. 1. Усилия при движении локомотива

Таблица 1

Основные характеристики электровоза НПСМ2М

$P_{2У}$, кВт	P_L , кН	R_K , м	$P_{СЦ}$, т	V_H , км/ч	F_{VH} , кН	R , м
1400	902,5	0,56	1100	30	160	0,1
l_L , м	h_L , м	Ψ_0	Ψ_{30}	M_M/M_H	F_{VM} , Н·м	
3,425	1,06	0,351	0,266	3,1	212,2	

В соответствии с уравнениями (2) и данными табл. 1 получены зависимости изменения давления тележек колес на рельсы от усилия сопротивления вагонов:

$$\begin{cases} F_{12}(F_V) = 451,25 - 0,073F_V; \\ F_{34}(F_V) = 451,25 + 0,073F_V. \end{cases} \quad (3)$$

В соответствии с [5] усилие сцепления рассчитывается по формуле [13]

$$F_{СЦ} = 1000m_L g \Psi, \quad (4)$$

где m_L – масса локомотива, т; g – ускорение свободного падения, м/с²; Ψ – коэффициент сцепления локомотива, равный отношению наибольшей силы тяги к весу локомотива.

В свою очередь, коэффициент сцепления зависит от скорости движения и качества путей и рассчитывается по формуле [5]

$$\Psi = a_\Psi + \frac{b_\Psi}{c_\Psi + d_\Psi V} - e\Psi V, \quad (5)$$

где a_Ψ , b_Ψ , c_Ψ , d_Ψ , e_Ψ – эмпирические коэффициенты; V – линейная скорость поезда, км/ч.

Значения параметров уравнения (5) для промышленного электровоза переменного тока НПСМ2М на подъездных путях приведены в табл. 2.

Значение коэффициента сцепления изменяется от 0,36 до 0,277 при изменении скорости V от 0 до 30 км/ч.

На рис. 2 приведены зависимости давления тележек колесных пар на рельсы F_{12} и F_{34} от силы сопротивления вагонов [7] F_V (уравнения (3), линии СВ и СА), а также зависимости наибольшей силы тяги тележек F_{C0} и F_{C30} к силе давления колес (коэффициент сцепления Ψ , линии ОБ и ОА). Дополнительно на рис. 2 пунктирными линиями отмечены номинальное тяговое усилие F_{VH} и максимальное F_{VM} (см. табл. 1).

По рис. 2 проводится оценка режима боксования. При номинальном тяговом усилии тележек (80 кН) давление передней и задней тележек колесных пар равны 438,85 и 463,65 кН (точки 1 и 2). Наибольшие силы тяги F_{C12} и F_{C34} при скорости 30 км/ч равны 121,76 и 128,23 кН (точки 5 и 6).

Запас по боксованию 39,5 и 45,9 кН. При максимальном тяговом усилии (106,1 кН) давление тележек колесных пар равно 435,75 и 466,75 кН (точки 3 и 4), а наибольшие силы тяги 120,7 и 129,3 кН. Запас по боксованию 14,6 и 23,2 кН, то есть запас по боксованию у передней тележки практически отсутствует и при дальнейшем увеличении силы тяги она перейдет в режим боксования. При трогании с места наибольшая сила тяги у передней тележки доходит до 160 кН (точка 8). С учетом критического момента M_M тележки могут создавать максимальное усилие до 250 кН, то есть при неумелом управлении тягой электровоза можно перевести в режим боксования обе тележки.

Таблица 2

Значения для расчета коэффициента сцепления

Наименование	a_Ψ	b_Ψ	c_Ψ	d_Ψ	e_Ψ
Промышленный электровоз переменного тока на подъездных путях	0,228	7	53	3	0

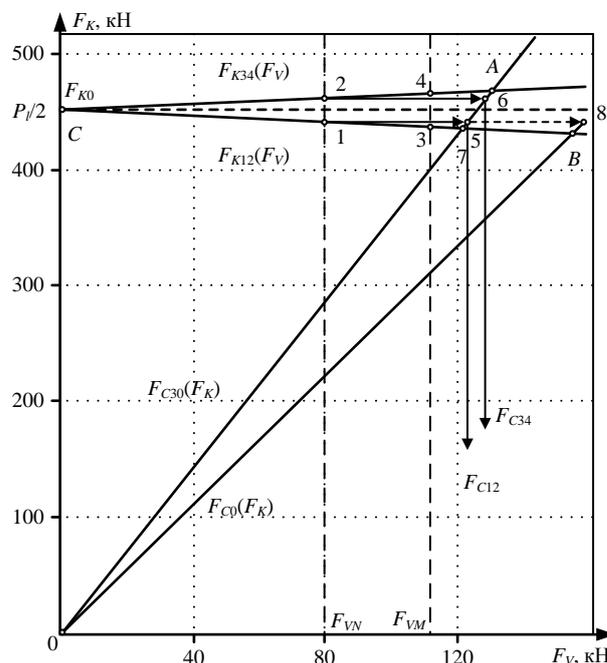


Рис. 2. Зависимости усилий от колес и сцепного усилия от усилия от вагонов

УСЛОВИЯ ВХОДА И ВЫХОДА ИЗ РЕЖИМА БОКСОВАНИЯ

При пуске поезда после выбора зазоров в сцепке двигатели работают в двигательном режиме, и усилие тяги уравнивается усилием сопротивления движению и динамическим усилием на разгон вагонов [1, 2]. Если при этом усилие тяги превысит усилие сцепления (задан слишком большой момент двигателя), то происходит срыв контакта с рельсом у передней тележки и начинается боксование, сопровождающееся увеличением угловой скорости вращения колес над линейной скоростью поезда (выполняется условие (8)). Колеса задней тележки вращаются без боксования (уравнения (3)). В этом случае по разнице скоростей должно сработать реле антибоксования и уменьшить задание на ток двигателя первой оси. Часто при пуске электровоза на холостом ходу формируется боксование 3-го типа, то есть в режим боксования переходят все колеса электровоза.

Для выхода из режима боксования нужно восстановить равенство скоростей, то есть подтормозить двигатель и установить усилие тяги меньше усилия сцепления (сбросить педаль газа). Дополнительно подсыпается песок под колеса локомотива. При этом увеличивается усилие сцепления [13].

При установившемся движении режим боксования наступает, когда поезд едет в гору. В этом случае увеличивается усилие сопротивления движению и становится больше усилие сцепления. При этом, чтобы не потерять скорость поезда и выйти из режима боксования, надо одновременно немного поднять задание на ток и подсыпать песок, чтобы усилие сцепления превысило силу тяги. Скорость колеса уменьшится, колеса локомотива выйдут из режима боксования.

В торможении поезда участвует локомотив за счет применения электрического торможения и вагоны за счет использования пневматических тормозов. Электрическое торможение может быть рекуперативным с отдачей энергии в сеть (система ПЧ-АД) или динамическим с рассеиванием энергии торможения на сопротивлениях (системы постоянного тока), однако оно не так эффективно, как пневматическое торможение, так как в этом случае в торможении участвует локомотив и все вагоны.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА БОКСОВАНИЯ

В настоящей статье рассмотрен новый подход к описанию процесса, заключающийся в разложении при боксовании общей массы поезда на три массы, причем первая и вторая масса (электродвигатели передней и задней тележек) вращаются, а третья масса (вагоны и электровоз) движется поступательно. Все выкладки сделаны для 4-го вида боксования.

До срыва контакта между колесом и рельсом при скорости движения поезда можно составить дифференциальное уравнение движения для всего поезда, которое описывает движение единой массы при постоянной инерционности (все зазоры выбраны) и переменных моментах и силах:

$$F_{K1}X_1 + F_{K3}X_3 + \Delta F_{C1}X_B + \Delta F_{C3}X_C - (F_{CV} + F_{CL}) = \left[3,6J_D \frac{X_1 + X_3}{R^2} + m_V + m_L \right] \frac{dV}{dt}, \quad (6)$$

где F_1, F_3 – электромагнитные тяговые усилия колесных пар, формируются во времени системой регулирования электровоза, Н·м; V – линейная скорость движения поезда, м/с; F_{CV}, F_{CL} – силы сопротивления вагонов и локомотива соответственно, Н; R_K, i, R – радиус колеса, передаточное отношение редуктора и радиус приведения, м; J_D – момент инерции ТЭД, кг·м²; m_V, m_L – полная масса вагонов и локомотива, соответственно, кг; X_1, X_3, X_B, X_C – логические коэффициенты, изменяющиеся при боксовании.

На основании дифференциального уравнения (6) составляется интегральное уравнение расчета скорости движения поезда:

$$V = \left(3,6J_D \frac{X_1 + X_3}{R^2} + m_V + m_L \right)^{-1} \times \int (F_{K1}X_1 + F_{K3}X_3 + \Delta F_{C1}X_B + \Delta F_{C3}X_C - (F_{CV} + F_{CL})) dt + V(0). \quad (7)$$

В режиме боксования (скольжение колес передней или задней тележек) при

$$V \neq \frac{\omega R_K}{i} \quad (8)$$

составляются два дифференциальных уравнения:

$$M_{12} - \Delta M_X - \Delta F_{C1} \frac{R_K}{i} X_B = 3,6J_D \frac{d\omega_{12}}{dt}; \quad (9)$$

$$M_{34} - \Delta M_X - F_{C3} \frac{R_K}{i} X_C = 3,6J_D \frac{d\omega_{34}}{dt}, \quad (10)$$

где $\Delta F_{C1}, \Delta F_{C3}$ – дополнительные усилия, зависящие от скорости боксования, Н·м; M_{12}, M_{34} – моменты на колесах на соответствующих участках характеристик боксования; ΔM_X – момент холостого хода «двигатель-колесо»; ω_{12}, ω_{34} – скорости движения колес на соответствующих участках характеристик боксования.

Дифференциальное уравнение (9) описывает угловую скорость вращения передней тележки с редуктором и колесной парой при срыве контакта между рельсом и колесами. Уравнение (10) описывает угловую скорость задней тележки с редуктором и колесной парой при срыве контакта между рельсом и колесами. Объединяет уравнения (9) и (10) дополнительные усилия ΔF_{C1} и ΔF_{C3} , формирующиеся как разница между усилием на колесе и усилием сцепления. Для вращающейся инерционности двигателя при расчете угловой скорости это усилие является тормозящим, а для поступательной массы поезда при расчете линейной скорости (7) – движущим. Усилия ΔF_{C1} и ΔF_{C3} задаются по [7] (рис. 3).

Максимальная сила сцепления, в соответствии с соотношением (5), зависит от скорости движения поезда (точки E_1, E_2 и E_3 на рис. 3), а силы сцепления могут быть представлены графическими зависимостями ($A_1-B_1-C_1-D_1-E_1-F_1$ для скорости 30 км/ч и т.д.). Участок C_1-D_1 показывает устойчивое движение без боксования. Тока D_1 соответствует началу боксования. На участке D_1-E_1 возможно длительное боксование, где в точке E_1 формируется максимальная сила сцепления. Участок E_1-F_1 показывает снижение силы сцепления, приводящее к разносному боксованию, потери механической энергии при движении поезда и нагреву колес.

На основании дифференциальных уравнений (9) и (10) составляются интегральные уравнения движения:

$$\omega_{12} = \frac{1}{3,6J_D} \int \left(M_{12} - \Delta M_X - \Delta F_{C1} \frac{R_K}{i} \right) dt + \omega_{12}(0), \quad (11)$$

$$\omega_{34} = \frac{1}{3,6J_D} \int \left(M_{34} - \Delta M_X - \Delta F_{C3} \frac{R_K}{i} \right) dt + \omega_{34}(0), \quad (12)$$

где ω_{12}, ω_{34} – скорости движения колес на соответствующих участках характеристик боксования.

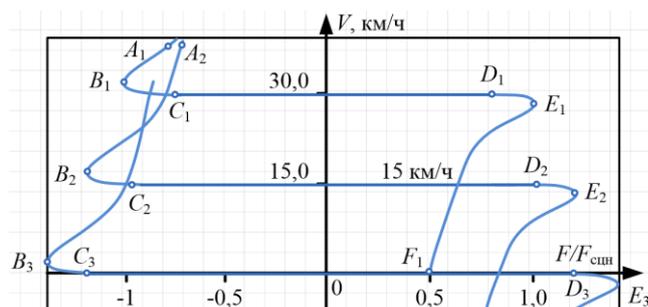


Рис. 3. Зависимости силы сцепления от скорости движения поезда

Интегральные уравнения (7), (11) и (12) используются в структурной схеме ТЭД при описании процесса боксования. Переход от уравнения (7) к системе (11) и (12) производится при выполнении условия (8), то есть при срыве контакта с рельсом при превышении усилия на колесе F_k (сила тяги) над усилием сцепления $F_{сц}$.

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для решения поставленных задач на основе уравнений (7), (11), (12) и с учетом модели [15] разработана компьютерная модель (асинхронный двигатель короткозамкнутый, высота оси 350 мм, скалярное управление [11], 2 тележки боксования, 1 редакция). Для примера на компьютерной модели рассчитаны переходные процессы пуска локомотива (92 т) и 12 четырехосных думпкаров 6ВС60 по 87 т (27 т пустой вагон и 60 т полезная нагрузка) с выбранными зазорами в сцепке при различных системах регулирования [15-18] и исследовании процесса боксования. В настоящей статье при выбранных зазорах и сцепном весе 1100 т поезд трогается с моментом сопротивления $0,2F_{VN}$ и моментом инерции $768,6J_{дв}$.

В соответствии с интегральными уравнениями (7), (11) и (12) происходит переключение значения логических коэффициентов компьютерной модели (табл. 3) в зависимости от режимов работы нормальная работа/боксование.

На рис. 4 приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами и началом боксования. Процесс пуска начинается с линейного задания тока статора ТЭД электровоза за 3,5 с до 1,6 о.е. (педаль газа). Максимальные значения тока и момента первого двигателя доходят до 1,7 и 1,6 о.е.

Таблица 3

Значения логических коэффициентов компьютерной модели

Логические коэффициенты Режим	X_1	X_B	X_0	X_C
Нормальный	1	0	1	0
Боксование 12	0	1	1	0
Боксование 34	1	0	0	1
Боксование 12 и 34	0	1	0	1

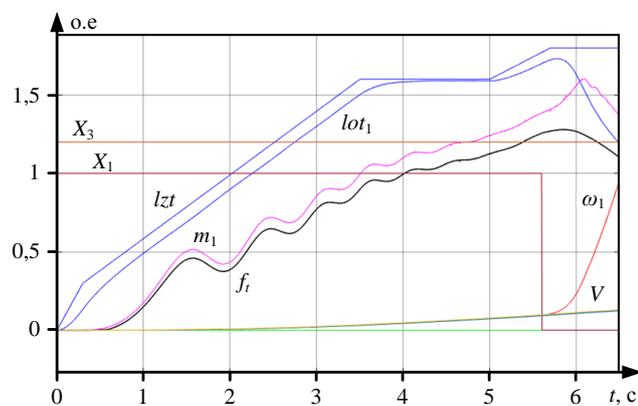


Рис. 4. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке и начале боксования передней тележки

В момент времени 5,0 с дается сигнал на увеличение задания тока статора до 1,8 о.е. Это приводит к увеличению силы тяги и превышению её над усилием сцепления передней тележки. Начинается процесс боксования в момент времени 5,6 с, сопровождающийся разрывом механической связи между движущимися колесами и рельсом. Начало процесса боксования отмечается логической переменной X_1 , показывающей окончание нормального режима работы. X_1 – логическая инверсия условия (8). Угловая скорость двигателя ω_1 значительно увеличивается, а линейная скорость V остается практически постоянной вследствие большой инерционности поезда. Этот процесс близок к разностному боксованию, а максимальная скорость ТЭД передней тележки будет ограничиваться только максимальной частотой ПЧ. Тяговое усилие электровоза уменьшается, так как передняя тележка практически выключена из процесса пуска.

На рис. 5 приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами и началом боксования. Отличие от рис. 4 состоит в увеличении задания тока статора до 2,2 о.е. Максимальные значения тока и момента двигателя доходят до 1,75 и 1,6 о.е.

Начинается процесс боксования передней тележки в момент времени 5,3 с. Задняя тележка переходит в боксование в момент времени 5,85 с (логическая переменная X_3). Угловые скорости двигателей тележек ω_1 и ω_3 значительно увеличиваются, а линейная скорость V остается практически постоянной вследствие большой инерционности поезда. Тяговое усилие и темп разгона поезда значительно уменьшаются.

На рис. 6 приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами, началом боксования передней тележки и ограничением скорости боксования. Отличие рис. 6 от рис. 4 состоит во включении системы ограничения скорости боксования в функции линейной скорости поезда. Система ограничения обеспечивает слежение за скоростью ω_1 от линейной скорости поезда с ошибкой в 2 Гц. Боксование передней тележки продолжается, но тяговое усилие не уменьшается, пуск поезда продолжается.

На рис. 7 приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами, началом боксования передней и задней тележек и ограничением скорости боксования.

Начинается процесс боксования передней тележки в момент времени 5,3 с. Задняя тележка переходит в боксование в момент времени 5,95 с. Угловые скорости двигателей тележек ω_1 и ω_3 незначительно увеличиваются по отношению к линейной скорости V , которая продолжает увеличиваться. Тяговое усилие снижается незначительно и становится равным $1,3 F_{VN}$. Длительное движение поезда в этом режиме возможно (участок D_1-E_1 на рис. 3).

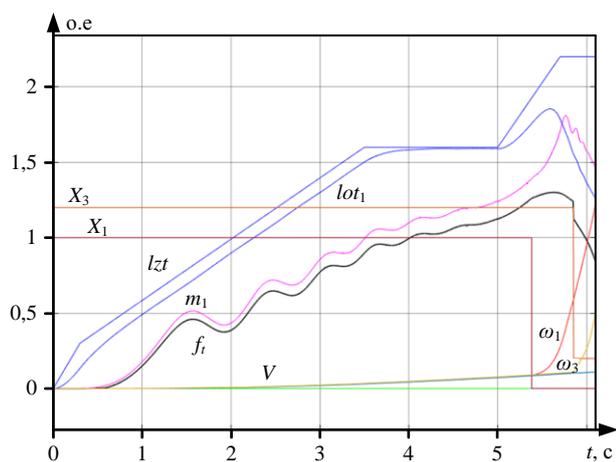


Рис. 5. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке и начале боксования передней и задней тележек

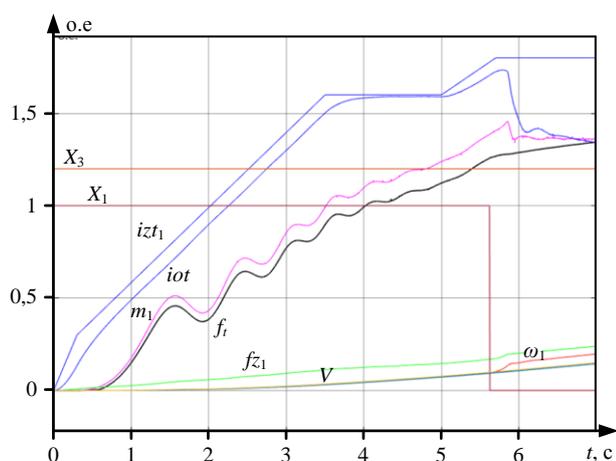


Рис. 6. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке, начале боксования передней тележки и ограничении скорости боксования

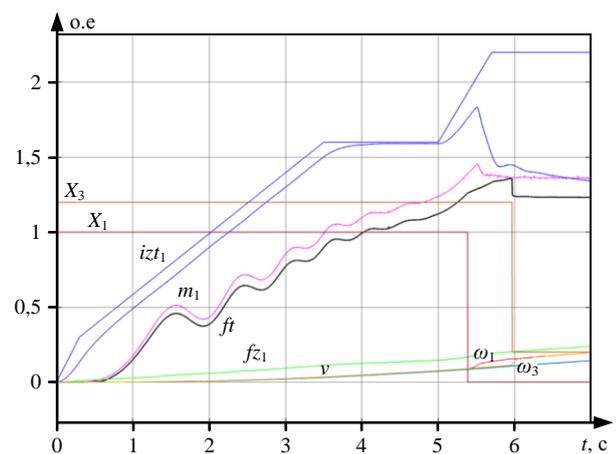


Рис. 7. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке, начале боксования передней и задней тележек и ограничении скорости боксования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выведены интегральные уравнения для расчета переходных процессов при боксовании четырехосного маневрового электровоза с учетом усилия тяги в сцепке, определены условия перехода в боксование передней и задней приводных тележек.

2. Доработанная компьютерная модель позволяет проводить исследования динамических режимов в электроприводе четырехосного электровоза при боксовании в системе ПЧ-АД со скалярным управлением и ограничением скорости боксования.

3. Применение системы ограничения скорости боксования в функции линейной скорости электровоза позволяет получить устойчивый режим тяги локомотива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коптилов В.И. Сила тяги локомотива и её теоретическое обоснование // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2017. № 11. С. 31-35.
2. Руднев В.С. Основы тяги поездов, сила тяги и тяговые характеристики локомотивов // Локомотив. 2017. № 12(732). С. 21-25.
3. Новосельцев В.П., Новосельцев П.В., Гордеева А.А. Влияние продольной жесткости пути на возможность проскальзывания колесных пар локомотива при движении в режиме тяги // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 4-1 (11). С. 93-95.
4. Самме Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами: монография. М.: Маршрут, 2005. 80 с.
5. Сидяков В.А., Андреева Л.А., Колчанов А.Г. Актуализация правил тяговых расчетов на промышленном железнодорожном транспорте // Методическое пособие к СП 37.13330.2012, «СНиП 2.05.07-91* Промышленный транспорт». М.: ЗАО «ПромтрансНИИпроект». 2016, 95 с.
6. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2019618026. Расчет нагрузок локомотива по траектории движения поезда / Танич В.О., Енин С.С., Омельченко Е.Я., Белый А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 05.06.2019, опубл. 26.06.2019.
7. Самме Г.В., Яковлев В.А. Характеристики сцепления и поведение моторно-колесных блоков электровоза при боксовании // Наука и техника транспорта. 2009. № 3. С. 16-26.
8. Результаты наладочных и приемочных испытаний промышленного электровоза НПМ2-001 / С.А. Крамсков, А.А. Курочка, С.Г. Волков, М.П. Шапиро, А.В. Киреев, Д.А. Кабанов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2005. № 2. С. 227-237.
9. Андриянов В.И., Никитенко В.С. НПМ2 – электровоз мирового уровня // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2008. № 2. С. 271-275.
10. Рябов Е.С. К вопросу создания маневровых электровозов // Журнал: Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2015. № 3 (112). С. 69-72.
11. Тяговый преобразователь на новой элементной базе для промышленного электровоза НПМ2 с асинхронным тяговым двигателем / И.В. Синявский, Л.В. Шитова, Е.О. Посохов, С.М. Изотов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2012. № 2(64). С. 23-32.
12. Самме Г.В. Новые результаты в теории сцепления локомотива // Транспорт Российской Федерации. 2010. №3(28). С. 14-16.
13. Ляпушкин Н.Н., Савоскин А.Н., Чукин А.А. Моделирование процессов сцепления локомотива с рельсом // Транспорт Российской Федерации. 2010. №6(31). С. 50-53.
14. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2014617766. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Моисеев В.О., Енин С.С.; заявитель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 03.06.2014, опубл. 20.08.2014.
15. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor / E. Omelchenko, T. Khramshin, V. Tanich, I. Kozhevnikov // IEEE Russian Workshop on Power Engineer-

ing and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI). IEEE, 2019. Pp. 59-63. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915408

16. Свидетельство о гос. регистрации прогн. для ЭВМ №2014617766. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Моисеев В.О., Енин С.С.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 03.06.2014, опубл. 20.08.2014.

17. Omelchenko E., Tanich V., Lyman A. The Operation Researching of a Traction Asynchronous Electric Drive in the Electric Locomotive on a Dynamic Model // Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2020. Pp. 44-49. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234347

18. Омельченко Е.Я., Моисеев В.О., Тележкин О.А. Анализ работы регуляторов тока // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4(44). С. 81-85.

Поступила в редакцию 03 июня 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SLIPPING PROCESS OF FOUR-AXLE SHUNTING ELECTRIC LOCOMOTIVE WITH INVERTER POWERED ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC DRIVE

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Momentum2@yandex.ru

Vasily O. Tanich

Associate Professor (Engineering), Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Shift-91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0098-6431>

Alexey B. Lyman

Assistant Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, lyman.alexei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2783-3662>

For a four-axle shunting electric locomotive, a mathematical description of the wheel set slipping process is made in the case of using the electric drive system "frequency converter - asynchronous motor". The relevance of the work lies in the possibility of using a computer model in the development and study of the asynchronous motor operation processes for the traction electric drive of an electric locomotive in various operating modes. The purpose of the article is to study transient slipping processes on a dynamic computer model of a traction asynchronous electric drive using the FC-AD system for a four-axle electric locomotive. The mathematical modeling methods in the Matlab Simulink environment, the basic provisions of physics, theoretical mechanics, the electric drive theory, electric machines theory, the theory of electric drive control systems, as well as a dynamic computer model of an asynchronous electric drive are used. The NPM2 industrial shunting electric locomotive developed by the Novochoerkassk Electric Locomotive Plant specifically for use at the production site of PJSC MMK was taken as the basis for creating the model. The developed computer model of the electric drive is tuned to the specific parameters of the traction motors, it allows you to calculate transients in the FC-IM system taking into account the choice of gaps in the coupling and slipping. The article gives a brief description of the wheel set slipping processes, describes the main types of these processes according to the conditions of the occurrence, developed differential equations of motion during slipping and structural diagrams of mathematical models that take into account the operation of the traction electric drive taking into account various control systems and slipping of a four-axle electric locomotive. The research group carried out assessment of transient processes for selected gaps of coupling devices along the entire train length, conditions for stable slipping are obtained, conclusions are made about the feasibility of introducing a linear speed sensor into the automatic control system of locomotive electric drives.

Keywords: four-axle electric locomotive, slipping, shunting locomotive, wheel set, traction electric drive, traction force,

slippage, adhesion force, wheel-rail system, frequency converter, asynchronous motor, computer model, control systems

REFERENCES

- Omelchenko E.Ya., Tanich V.O., Enin S.S., Lyman A.B. Dynamic mathematical model of the system "frequency inverter – asynchronous drive" with vector control". Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2015614458.
- Omelchenko E., Tanich V., Kopotilov V.I. Traction power of a locomotive and its theoretical substantiation. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik*. [Transport: science, technology, management. Scientific information collection], 2017, no. 11, pp. 31-35. (In Russian)
- Rudnev V.S. Fundamentals of train traction. Traction force and traction characteristics of locomotives. *Lokomotiv [Locomotive Engine Journal]*, 2017, no. 12 (732), pp. 21-25. (In Russian)
- Novoseltsev V.P., Novoseltsev P.V., Gordeeva A.A. Influence of the track longitudinal rigidity on the possibility of the locomotive wheelset slipping when moving in the traction mode. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International research journal]*, 2013, no. 4-1 (11), pp. 93-95. (In Russian)
- Samme G.V. *Frikcionnoe vzaimodejstvie kolesnyh par lokomotiva s rel'sami* [Frictional interaction of locomotive wheelsets with rails]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 80 p. (In Russian)
- Sidyakov V.A., Andreeva L.A., Kolchanov A.G. *Aktualizatsiya pravil tyagovyh raschetov na promyshlennom zheleznodorozhnom transporte* [Updating the rules for traction calculations in industrial railway transport. Methodological guide to SoR 37.13330.2012, BC 2.05.07-91 Industrial transport]. Moscow, CJSC PROMTRANSNII PROECT Publ., 2016. 95 p. (In Russian)
- Tanich V.O., Enin S.S., Omelchenko E.Ya., Bely A.V. *Raschet nagruzki lokomotiva po traektorii dvizheniya poezda* [Calculation of the load of the locomotive along the trajectory

- ry of the train]. Computer program RF, no. 2019618026, 2019.
8. Samme G.V., Yakovlev V.A. Clutch characteristics and behavior of motor-wheel blocks of an electric locomotive during boxing. *Nauka i tekhnika transporta* [Journal of Science and Technology of Transport], 2009, no. 3, pp. 16-26. (In Russian)
 9. Kramskov S.A., Kurochka A.A., Volkov S.G., Shapiro M.P., Kireev A.V., Kabanov D.A. Results of adjustment and acceptance testing of the electric industrial locomotive NPM2-001. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i projektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya* [All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2005, no. 2, pp. 227-237. (In Russian)
 10. Andriyanov V.I., Nikitenko V.S. NPM2 is a world-class electric locomotive. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i projektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2008, no. 2, pp. 271-275. (In Russian)
 11. Ryabov E.S. On the issue of creating shunting electric locomotives. Information and key systems on the transshipment transport, 2015, no. 3 (112), pp. 69-72.
 12. Sinyavskiy I.V., Shitova L.V., Posokhov E.O., Izotov S.M. Traction converter made with a new element base for an industrial electric locomotive NPM2 with an asynchronous traction motor. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i projektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2012, no. 2 (64), pp. 23-32. (In Russian)
 13. Samme G.V. New results in the theory of locomotive adhesion. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation], 2010, no. 3 (28), 14-16 pp. (In Russian)
 14. Lyapushkin N.N., Savoskin A.N., Chukin A.A. Modeling the processes of a locomotive adhesion to a rail. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation], 2010, no. 6(31), pp. 50-53. (In Russian)
 15. Omelchenko E., Khramshin T., Tanich V., Kozhevnikov I. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019, pp. 59-63. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915408
 16. Omelchenko E.Ya., Telezhkin O.A., Moiseev V.O., Enin S.S. Dynamic mathematical model of a three-phase asynchronous motor with a squirrel-cage rotor. Computer program RF, no. 2014617766. (In Russian)
 17. Lyamar A. The Operation Researching of a Traction Asynchronous Electric Drive in the Electric Locomotive on a Dynamic Model. 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2020, pp. 44-49, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234347
 18. Omelchenko E. Ya., Moiseev V.O., Telezhkin O.A. Analysis of the current regulators operation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 4(44), pp. 81-85. (In Russian)

Омельченко Е.Я., Танич В.О., Лымарь А.Б. Процесс боксования четырехосного маневрового электровоза с тяговым электроприводом по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 28-35. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-28-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-28-35)

Omelchenko E.Ya., Tanich V.O., Lyamar A.B. Slipping Process of Four-Axle Shunting Electric Locomotive with Inverter Powered Asynchronous Traction Electric Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 28-35. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-28-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-28-35)