

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГРУЗОВОГО ЛОКОМОТИВА**
Ковалев Р.В., Матюшков С.Ю., Пугачев А.А., Роговцев Г.В., Федяева Г.А.
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

Аннотация. Представлены блок-схема, принципы построения компьютерной модели и результаты моделирования мехатронной системы тягового электропривода локомотива с регулированием электромагнитного момента асинхронных двигателей на пределе сцепления колес с рельсами и контролем вибраций в тяговой передаче.

Abstract. The flow block, computer model principle of design and simulation results for mechatronic system of locomotive tractive electric drive with adjustment asynchronous drive torque with limit of wheel-rails adhesion and vibration control within tractive transmission are represented.

Создание новых отечественных грузовых локомотивов с высокими тяговыми качествами требует высокодинамичного регулирования энергетических потоков с целью оптимальной передачи усилий от колеса на рельс в режимах тяги и торможения. Наибольшие перспективы в этом направлении открывает асинхронный тяговый электропривод (АТЭП). За последнее десятилетие в России спроектированы и изготовлены современные локомотивы с АТЭП отечественного производства: маневровый тепловоз ТЭМ21 и магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ25А («Витязь»). Испытания и эксплуатация этих локомотивов, разработанных и выпущенных совместно Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом подвижного состава (ВНИКТИ, г. Коломна) и Брянским машиностроительным заводом (БМЗ), позволяют определить пути дальнейшего совершенствования системы управления (СУ) тяговым электроприводом.

Процесс реализации каждым колесом локомотива тягового усилия $F_k = \psi \times N$, где F_k – сила тяги колеса, ψ – коэффициент сцепления; N – сила вертикального нажатия колеса на рельс; сопровождается проскальзыванием колес. Скорость колеса v_k отличается от скорости локомотива v_l на величину проскальзывания (скольжения) $\Delta v = v_k - v_l$. Реальная функция изменения коэффициента сцепления ψ и сил в контакте колесо-рельс в зависимости от скольжения колес имеет стохастический характер. В частности, измерения показывают, что существует определенная область разброса значений, ограниченная двумя кривыми (рис. 1) [1]. При расчетах часто используют усредненную экспериментальную зависимость, называемую характеристикой сцепления (рис. 2) [2, 3].

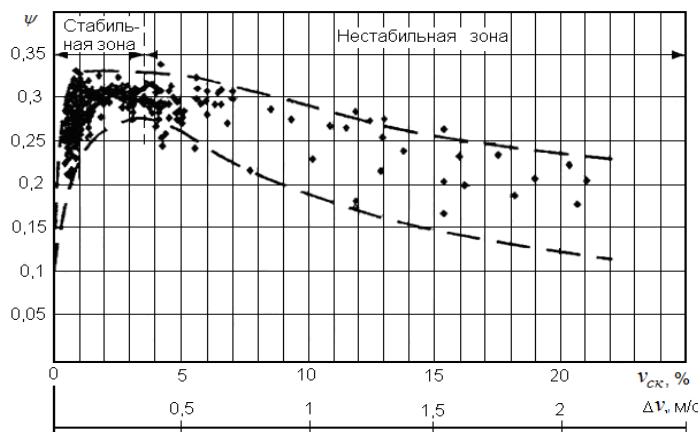


Рис. 1. Измеренные значения коэффициента сцепления

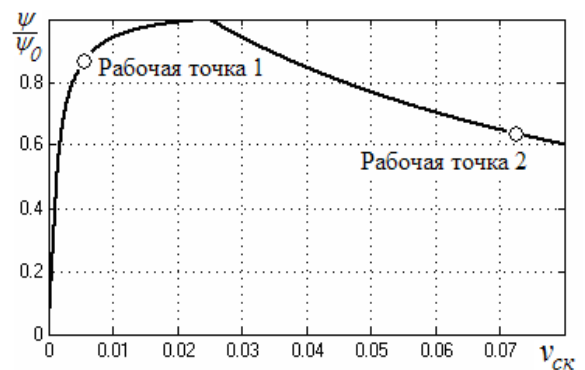


Рис. 2. Вариант представления характеристики сцепления

На рис. 1, 2 $v_{ск}, \%$ – скольжение колес, выраженное в процентах от скорости локомотива (скольжение может быть выражено также в долях от скорости локомотива: $v_{ск} = \Delta v / v_{л}$). Справа от максимума сцепления расположена нестабильная зона, в которую смещается точка работы системы электропривода (рабочая точка), если электромагнитный момент тягового двигателя превышает предел по сцеплению, когда сила на ободу колеса, создаваемая двигателем, становится больше силы сцепления $F_{сц} = \psi_0 \times N$, где $F_{сц}$ – сила сцепления колеса с рельсом, ψ_0 – потенциальный, т.е. максимально возможный коэффициент сцепления при заданном состоянии рельсов. Зависимости, представленные на рис. 1, 2, даны для режима тяги локомотива. Для режима торможения проскальзывание колес отрицательно, и эти зависимости имеют аналогичный вид, но расположены в третьем квадранте координатной плоскости.

При увеличении проскальзывания рабочая точка электропривода попадает в нестабильную зону на падающий участок характеристики сцепления, и при этом возникают так называемые нестационарные динамические режимы тягового электропривода: буксование или юз. На нисходящем участке (рис. 2, рабочая точка 2) в процессе буксования или юза скольжение колес может существенно возрасти, повреждая поверхности бандажей. Кроме того, возможен эффект самовозбуждения колебаний в тяговом тракте (автоколебания), так как отрицательная крутизна (падающая характеристика) соответствует отрицательному гашению, то есть усилению колебаний, что может вызвать повышенный износ и повреждение элементов тяговой передачи.

Для современных грузовых магистральных и маневровых локомотивов с высоким электромагнитным моментом асинхронных тяговых двигателей (АТД) целесообразна реализация максимально возможных тяговых усилий, т.е. регулирование электропривода на максимуме кривой сцепления. Однако по вышеизложенным причинам на этом максимуме весьма сложно удержаться, необходимо специальное управление АТЭП.

Общие принципы построения СУ АТЭП, применяемые на зарубежных локомотивах [4], – это привязка задания на ускорение ротора АТД к ускорению локомотива, и поиск системой управления максимального значения силы тяги (момента АТД). Известные СУ предлагается модифицировать в соответствии с блок-схемой рис. 3.

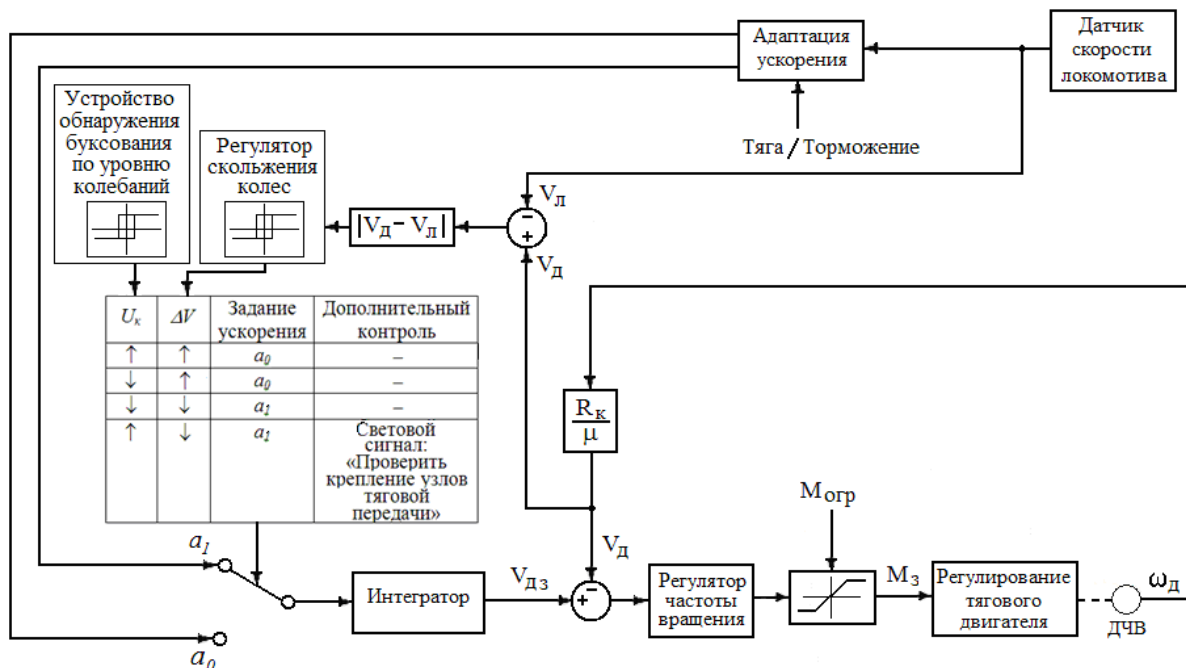


Рис. 3. Блок-схема системы управления АТЭП грузового локомотива

В применяемых системах экстремального регулирования [4], где при заданном отклонении ΔM момента двигателя от максимума изменяется задание на ускорение ротора АД, имеются следующие недостатки: 1) требуемую величину отклонения ΔM весьма сложно правильно определить, и при превышении этой величиной некоторого порогового значения возможно возникновение фрикционных автоколебаний и повышенных вибраций в тяговой передаче; 2) необходим дополнительный контроль проскальзывания на влажных рельсах, где кривая сцепления не имеет явно выраженного максимума, в отличие от графиков, приведенных на рис. 1, 2.

В системе управления тяговым электроприводом локомотива на пределе по сцеплению колес с рельсами (рис. 3) используется внешний контур регулирования частоты вращения тягового двигателя по отклонению, где задание на частоту вращения двигателя, приведенную к ободу колеса, определяется путем интегрирования задания на ускорение, выбираемого из двух значений: a_0 , которое в режиме тяги на небольшую величину Δa меньше линейного ускорения локомотива a_L , и a_1 , которое в режиме тяги на Δa больше a_L (в режиме торможения наоборот), а также внутренний контур регулирования момента двигателя, входным сигналом которого является выходной сигнал регулятора частоты вращения с учетом ограничения по моменту, поступающего из СУ верхнего уровня.

Отличием предлагаемой системы является то, что выбор между значениями $a_0 = a_L - \Delta a$ и $a_1 = a_L + \Delta a$ (в режиме тяги) или $a_0 = a_L + \Delta a$ и $a_1 = a_L - \Delta a$ (в режиме торможения) выполняется в соответствии с таблицей переключений (рис. 3) по сигналам:

- устройства обнаружения буксования и юза колес рельсового транспортного средства по уровню колебаний U_k в тяговом тракте [5], имеющего релейную характеристику с гистерезисным допуском без зоны нечувствительности и переключающегося при повышении уровня колебаний выше значения U_{kmax} и понижении ниже значения U_{kmin} ;

- регулятора абсолютной величины скольжения $\Delta V = |V_D - V_L|$, имеющего релейную характеристику и переключающегося при увеличении ΔV выше значения ΔV_{max} и уменьшении ниже значения ΔV_{min} ; где ΔV – абсолютная величина скольжения, м/с, V_D – частота вращения ротора двигателя, приведенная к ободу колеса, V_L – линейная скорость локомотива.

Причем релейные устройства обнаружения буксования [5], контролирующие уровень колебаний (вибраций) в тяговом тракте, настраиваются одинаково для всех осей локомотива, а верхнее и нижнее предельные значения скольжения устанавливаются неодинаковыми для разных осей локомотива: верхние значения из интервала $0,4 \text{ м/с} \leq \Delta V_{max} \leq 0,8 \text{ м/с}$; нижние значения из интервала: $0,17 \text{ м/с} \leq \Delta V_{min} \leq 0,25 \text{ м/с}$.

Основные принципы функционирования данной СУ проверены на основе моделирования разгона шестиосного магистрального локомотива в плохих погодных условиях (рис. 4, а, б). Моделирование мехатронной системы АТЭП локомотива выполнено с использованием совмещения программных комплексов MatLab и «Универсальный механизм» (УМ): электрическая часть АТЭП моделируется в MatLab, механическая – в УМ [6]. Динамическая модель локомотива, выполненная в УМ с высокой степенью детализации, имеет 97 степеней свободы и включается в модель MatLab в виде S-функции с использованием нового интерфейса, разработанного в БГТУ на кафедре «Прикладная механика» под руководством профессора Д.Ю. Погорелова.

В качестве системы регулирования АД каждой оси локомотива в соответствии с блок-схемой рис. 3 моделируется система прямого управления моментом (Direct Torque Control, - сокращенно DTC), АД представлены в MatLab на базе двухфазной обобщенной машины. В модели СУ использован пропорциональный регулятор частоты вращения АД, что в сочетании с релейным регулятором скольжения и DTC позволяет получить высокие динамические свойства АТЭП. Для определения V_L и a_L допустимо ис-

пользовать вместо датчика скорости локомотива сигнал средней скорости роторов, адаптированный по специальному алгоритму.

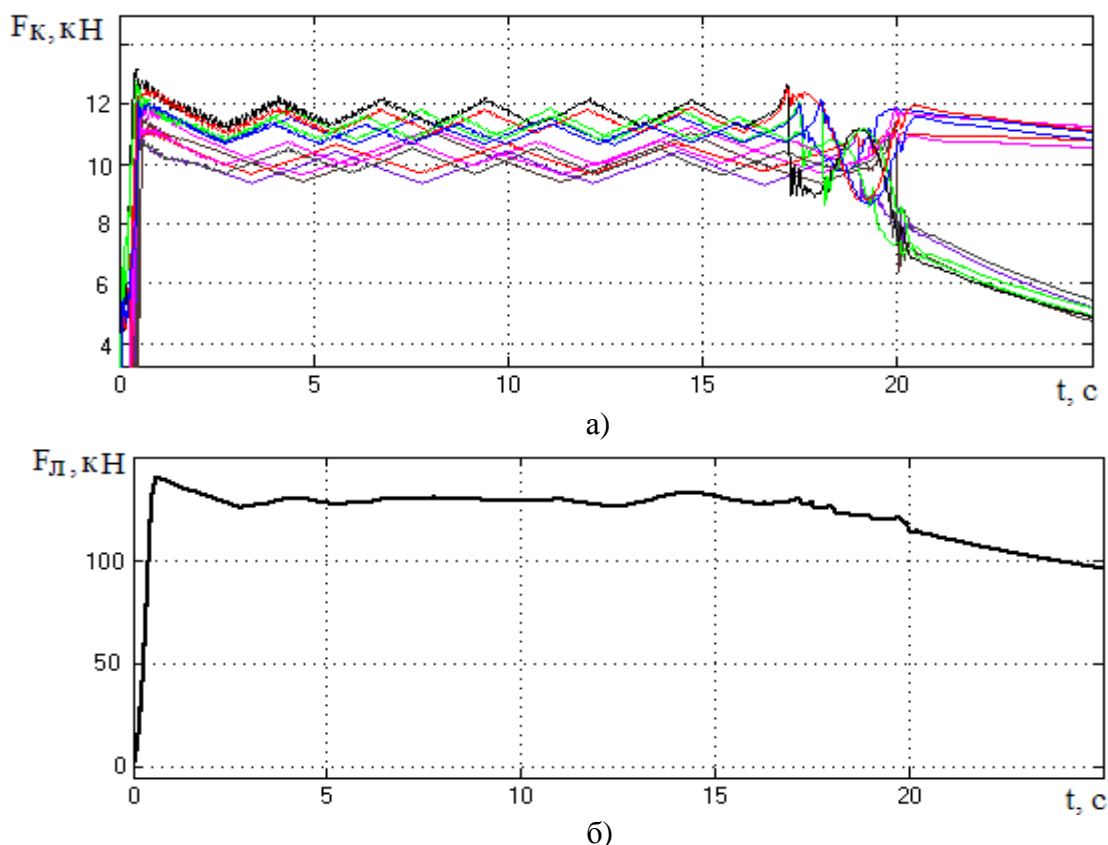


Рис. 4. Результаты моделирования разгона локомотива при регулировании АТЭП на пределе по сцеплению в плохих погодных условиях ($\psi_0=0,1$): а) силы тяги колес 1...6 осей (F_k); б) сила тяги локомотива (F_l).

Моделирование показывает, что предлагаемая система управления АТЭП обеспечивает использование потенциальных условий сцепления на уровне не ниже 90 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 08-01-00677-а.

Список литературы

1. Энгель Б. Регулирование тяги с высоким использованием сил сцепления// Железные дороги мира. - 1999.- № 2.- С. 39-45.
2. Меншутин Н.Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях // Науч. труды Всесоюз. н.-и. ин-та ж.-д. транспорта. - М.: Трансжелдориздат, 1960. - Вып. 188. - С. 113-132.
3. Polach O. Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail, - Vehicle System Dynamics Supplement. – 35 (2001). – P. 7-22.
4. Бушер М. и др. Регулирование проскальзывания колес на электровозах с асинхронным тяговым приводом// Железные дороги мира. - 1994.- № 4.- С. 30-45.
5. Павленко А.П., Павленко А.А. Клепиков В.Б., Кутовой Ю.Н. Устройство обнаружения буксования и юза колес рельсового транспортного средства. – Заявка 94044536/11, 14.12.1994 В60L3/10.
6. Федяева Г.А., Погорелов Д.Ю. Оценка динамических нагрузок тягового привода на электромеханических моделях перспективных тепловозов// Тяжелое машиностроение, 2007.- № 10.- С. 30-35.