

Е.Н. ШАПРАН

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЗОВ С ВЫСОКИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛ СЦЕПЛЕНИЯ

У статті розглянуті перспективи застосування різних систем регулювання електропередач тепловозів, а також використуваних методів виявлення буксування.

In the article advanced application of different control systems of power transmissions of gasoline locomotives, and also used methods of detection of skid are considered.

Постановка проблеми. Тенденция повышения эффективности эксплуатации подвижного состава выдвигает высокие требования к техническому совершенству локомотивов и повышению их тягово-сцепных свойств, которые неразрывно связаны с улучшением тяговых передач. В настоящее время идет разработка новых, а также модернизация существующих тепловозов с применением микропроцессорных систем управления, обеспечивающих высокое использование сил сцепления. Однако, до настоящего времени не удалось выработать единого подхода по структуре этих систем, а также определить для них оптимальные значения многих параметров. Так, например, занижение допустимых уровней скольжения ведет к недоиспользованию тяговых возможностей локомотивов. С другой стороны, значительное скольжение при буксовании приводит к повышенному износу бандажей колесных пар и рельсов, а также к повреждениям тяговых двигателей (ТД) и передач из-за интенсификации динамических режимов.

В связи с вышеизложенным особый интерес вызывают исследования, направленные на совершенствование систем регулирования электропередач тепловозов за счет придания им адаптивных свойств, исходя из реальных процессов, происходящих в системе локомотив – тяговый привод – колесная пара – рельсовый путь – состав.

Анализ последних достижений и публикаций. Теоретическими исследованиями повышения тягово-сцепных свойств локомотивов занимались известные отечественные и зарубежные учёные: А.Л. Голубенко [1], В.Е. Гайдуков, Л.К. Филиппов [2], М.Р. Барский [3], Е.Г. Бовэ [4], И.П. Исаев [5], Д.К. Минов [6], А.П. Павленко [7], Ohishi K., Ogawa Y [8], В.Мeyer [9] и др.

В настоящее время в США на локомотивах SD50 и SD60 используются высокоэффективные электропередачи с противобуксовочными системами Super Series фирмы General Motors [9]. Созданием подобных систем активно занимаются ведущие фирмы России [10], Германии (AEG) [11] и Японии [8].

Появившиеся за последние годы в Западной Европе и США противобуксовочные системы [9], имеющие радиолокационный (с использованием эффекта Доплера) измеритель абсолютной скорости движения экипажа, датчики непрерывного измерения диаметров колес локомотива по кругу катания каждой колесной пары, позволяют исключить ряд известных недостатков противобуксовочных систем (влияния синхронности буксования и различия диаметров колес по кругу катания) и существенно повысить их чувствительность. Однако, как известно [7], доплеровские системы измерения скорости дают достаточно большую погрешность при малых скоростях движения локомотивов (от 0 до 5 – 8 км/ч), для которых наиболее характерны режимы буксования. Имеется ряд других микропроцессорных систем [11], алгоритмы работы которых недостаточно адаптированы к реальным условиям сцепления колеса с рельсом. Поэтому поиск путей решения этой проблемы является перспективным направлением научных исследований [5, 8 – 12].

Целью данной работы является исследование методов и технических средств регулирования тяговых передач локомотивов, повышающих использование сил сцепления, особенно при незначительных скоростях движения по загрязненным рельсам.

Изложение основного материала. Прежде всего, более подробно проанализируем работу двух высокоэффективных микропроцессорных систем регулирования скольжения колесных пар локомотивов - Super Series (тепловоз SD50) [9] и УСТА-М (тепловоз 2ТЭ116 с поосным регулированием) [10].

Из рис. 1 видно, что Super Series – не только противобуксовочная система. Она является общей системой управления для тяговых двигателей с последовательным возбуждением и регулирует при необходимости крип, чтобы использовать повышенный коэффициент сцепления. Ее назначение – реализация преимуществ, которые дает более высокий уровень крипа в условиях ограниченного сцепления при движении по руководящему уклону, в кривых малого радиуса и при неблагоприятных погодных условиях. При движении по пути, где сцепление не лимитировано, эта система устраняет случайные проскальзывания колес более эффективно, чем традиционные противобуксовочные системы при меньших или таких же уровнях крипа.

В системе Super Series, благодаря использованию радиолокационного измерителя скорости движения локомотива ИС, программируемых характеристик тяговых двигателей и фактических (измеренных) значений токов якорей, постоянно рассчитывается изменяющееся ограничение по напряжению, по величине которого регулируют допустимое проскальзывание колес в пределах мощностных возможностей локомотива. Рассмотрим более подробно алгоритм работы этой системы.

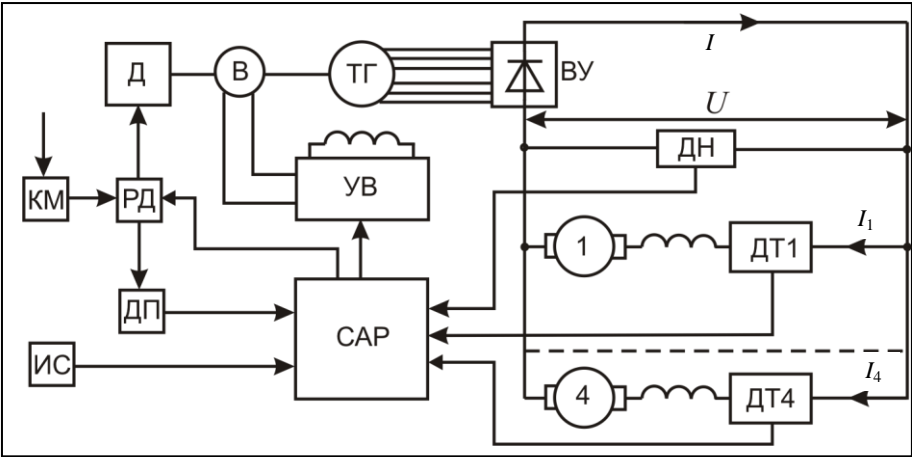


Рис. 1. Функциональная схема тяговой передачи тепловоза SD50 [9] с микропроцессорной системой управления Super Series: Д – дизель; В – возбудитель; ТГ – тяговый генератор; ВУ – выпрямитель; УВ – управляемый выпрямитель; КМ – контроллер машиниста; РД – регулятор дизеля; ДП – датчик положения реек топливных насосов; 1 – 4 – тяговые двигатели; САР – система регулирования тяговой передачи; ДТ1 – ДТ4, ДН – датчики тока и напряжения; ИС – измеритель скорости локомотива

Напряжение U на тяговых двигателях с последовательным возбуждением можно выразить так:

$$U = \frac{30}{\pi r} V_{\text{л}} \left(\frac{E}{n} \right) + IR_{\Sigma}, \quad (1)$$

где I – ток якоря двигателя; E – ЭДС двигателя; n – частота вращения якоря; $V_{\text{л}}$ – скорость движения локомотива (измеренная радаром); R_{Σ} – суммарное сопротивление цепи якоря двигателя; r – радиус колеса. В памяти микропроцессорной системы записаны параметры нагрузочных характеристик всех тяговых двигателей $E/n = f(I)$, поэтому при измерении токов $I_1 - I_4$ имеется возможность вычисления мгновенных значений $(E/n)_j$ и IR_{Σ} каждого двигателя $j = \overline{1, 4}$. Затем определяется предельное напряжение на каждом тяговом двигателе, при котором он может работать со скольжением, превышающим фактическую скорость локомотива на величину ΔV , по такой зависимости:

$$U_j^{\max} = \frac{30}{\pi r} (V_{\text{Л}} + \Delta V) \left(\frac{E}{n} \right) + IR_{\Sigma}. \quad (2)$$

Если $U < U_j^{\max}$, т. е. внешние условия, определяющие уровень сцепления, таковы, что соотношение между реализуемыми мощностью и коэффициентом сцепления позволяют использовать более низкий уровень крива чем ΔV , определенный системой управления, то система Super Series не уменьшает ток возбуждения тягового генератора (напряжение U). Только в случае, если $U \geq U_j^{\max}$, возникает необходимость уменьшения уровня заданной мощности дизель-генератора и, соответственно, напряжения U на тяговых двигателях так, чтобы реализуемая величина скольжения не превысила допустимого значения ΔV .

В работе [9] показано, что максимум кривой крива может соответствовать различным его уровням – от 1 до 15%. Поэтому в систему было добавлено устройство поиска максимального значения крива, которое непрерывно анализирует величину тока тягового генератора I (выпрямительной установки ВУ), являющегося показателем общего уровня сцепления локомотива. В результате периодических измерений определялась тенденция изменения тока тягового генератора, и при его росте дискретно изменялся предел крива ΔV на один шаг в том направлении, в котором произошло последнее изменение тока. В противном случае предел ΔV изменялся на один шаг в противоположном направлении.

Приведенный алгоритм работы системы Super Series позволяет отметить следующие недостатки:

1. Снижение эффективности регулирования скольжения из-за большой постоянной времени канала возбуждения тягового генератора.
2. Большая погрешность радарной системы измерения малых скоростей движения локомотива, для которых наиболее характерны режимы буксования.
3. Возможные перегрузки по току параллельно работающих тяговых двигателей, которые имеют повышенные скоростные характеристики или связаны с колесными парами, имеющими наибольшие диаметры колес по кругу катания.

Одним из эффективных способов устранения вышеперечисленных недостатков и повышения тяговых свойств локомотивов с электрической передачей является индивидуальное распределение мощности между тяговыми двигателями в зависимости от сцепных свойств колесных пар с рельсами. Рассмотрим технические особенности реализации этого способа на примере электрической передачи переменного-постоянного тока магистрального тепловоза 2ТЭ116 с микропроцессорной системой управления, структурная схема которой приведена на рис. 2 [10].

В этой электропередаче за счет регулирования возбуждения тягового

генератора применена групповая защита от буксования одной или нескольких колесных пар, а также избирательная защита путем регулирования напряжения на каждом тяговом двигателе. Такой подход определил структуру системы регулирования скольжения, элементы которой входят в контур регулирования мощности дизель-генератора и контур регулирования скорости вращения каждой колесной пары.

Необходимо отметить, что в системе УСТА-М пропорционально свободной мощности дизеля устанавливается максимально допустимое ускорение колесных пар $d\omega/dt$. Затем в регуляторе мощности этот сигнал интегрируется по времени, в результате чего определяется заданная угловая скорость вращения колесных пар ω_3 , т.е. скорость движения локомотива. При этом фактическая угловая скорость вращения колесных пар ω_{cp} определяется путем усреднения сигналов $\omega_1 - \omega_6$ тахогенераторов Тх1 – Тх6.

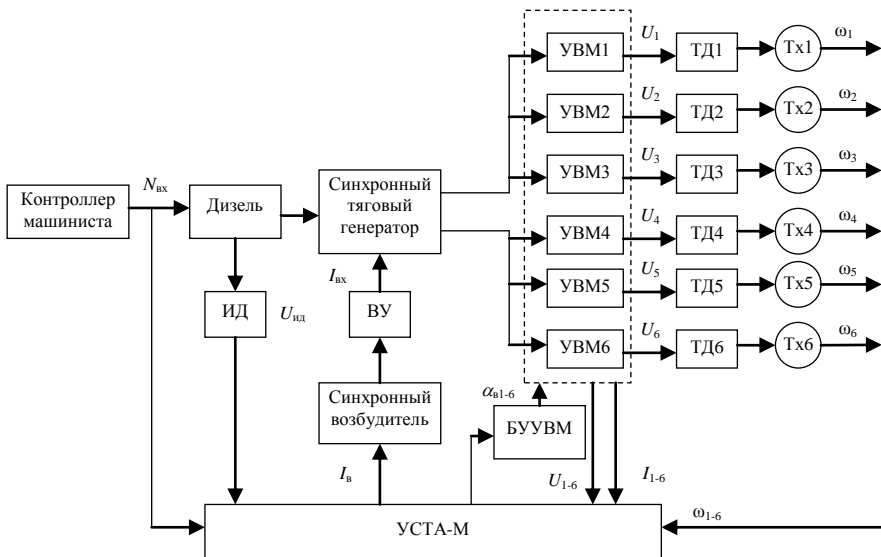


Рис. 2. Структурная схема электрической передачи тепловоза 2ТЭ116 с системой поосного регулирования касательной силы тяги: УВМ1 – УВМ6 – управляемые выпрямительные установки; ТД1 – ТД6 – тяговые двигатели; Тх1 – Тх6 – тахогенераторы; УСТА-М – микропроцессорная система управления электропередачей; БУУВМ – блок управления выпрямительными установками; ВУ – выпрямитель; ИД – индуктивный датчик

В каждом i -м цикле выполнения управляющей программы определяется разность $\pm\Delta\omega = \omega_3 - \omega_{cp}$, согласно которой каналом регулирования мощности

задаётся ток возбуждения I_B синхронного возбудителя СВ и, соответственно, ток возбуждения $I_{ВГ}$ и напряжение U_c тягового генератора (рис. 2). При буксовании одной или нескольких колесных пар рассогласование $\Delta\omega$ будет иметь отрицательное значение ($\omega_{ср} > \omega_3$). Это приведет к тому, что мощность на выходе тягового генератора, которая передается тяговыми двигателям, будет ограничиваться на достигнутом уровне, обеспечивая защиту от синхронного буксования колесных пар. Кроме того, дальнейшее перераспределение мощности между буксующими колесными парами производится в контурах регулирования угловых скоростей вращения тяговых двигателей путем изменения сигналов блоком управления БУУВМ управляемых выпрямителей УВМ1 – УВМ6 (рис. 2) в соответствии с законом:

$$\alpha_j = 180Z_j, \quad (3)$$

где $0 \leq Z_j \leq 1$ – нормированный сигнал, зависящий от угловой скорости вращения j -й колесной пары ω_j , ее углового ускорения $d\omega_j/dt$ и скорости изменения углового ускорения $d^2\omega_j/dt^2$. Условие включения регулятора частоты вращения колесных пар определяется логической функцией:

$$F(\Delta\omega_j, \omega_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta\omega_j = \omega_j - \omega_{\min} \geq K_6 \cdot \omega_{\min} \text{ или } \frac{d\omega_j}{dt} \geq 1,15 \text{ рад/с}^2, \\ \text{или } \frac{d^2\omega_j}{dt^2} \geq 1,35 \text{ рад/с}^3 \text{ при } \Delta\omega_j > 0 \wedge \frac{d\omega_j}{dt} > 0; \\ 0, & \end{cases} \quad (4)$$

где $\frac{d\omega_j}{dt}$ – расчетное ускорение буксующей колесной пары; $\frac{d^2\omega_j}{dt^2}$ – скорость изменения ускорения; $K_6 = 0,06 - 0,0012$; V_L – коэффициент усиления контура.

При выполнении условия (4) напряжение на выходе управляемого выпрямителя УВМ изменяется согласно уравнению:

$$U_i = U_{i-1} \left(1 - K_3 \Delta\omega_i - K_4 \frac{d\omega_i}{dt} - K_5 \frac{d^2\omega_i}{dt^2} \right), \quad (5)$$

где U_i, U_{i-1} – выпрямленное напряжение, подведенное к тяговому двигателю, связанному с буксующей колесной парой в i -м и $(i - 1)$ -м шаге измерений; $K_3 - K_5$ – коэффициенты усиления.

Структурная схема системы УСТА-М, а также описанные алгоритмы её работы, представляющие по сути методы регулирования с псевдобегунковой колёсной парой, позволяют отметить следующие недостатки:

1. Интегрирование ускорений в контуре регулирования мощности дизель-генератора без коррекции коэффициента усиления может привести к синхронному буксованию колесных пар, так как происходит постепенное накопление влияния систематических погрешностей, которые не распознаются системой регулирования ввиду случайных параметров скоростных характеристик тяговых двигателей и диаметров колесных пар.

2. Не обеспечивается, по сравнению с системой Super Series, адаптивное управление электропередачей по максимуму коэффициента сцепления в широком диапазоне возможных состояний поверхностей рельсов из-за относительно жёсткого нормирования условия включения контура регулирования частоты вращения колесных пар согласно функциональной зависимости (4).

Кроме того, не обеспечивается более высокий уровень скольжения передних колесных пар (по ходу движения), поэтому не реализуется эффект очистки рельсов для улучшения условий сцепления последующих колёсных пар без применения песка.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим возможность придания системе УСТА-М адаптивных функций для устранения указанных недостатков. Для этого необходимо на программном уровне реализовать алгоритм поиска экстремума коэффициента сцепления за счет динамического регулирования скольжения каждой колесной пары. Блок-схема такого алгоритма приведена на рис. 3.

Из блок-схемы алгоритма (рис. 3) видно, что путем периодических измерений токов якорей $I_1 - I_6$ тяговых двигателей определяются тенденции роста уровней сцепления.

При росте тока I_i в i -м цикле измерения по сравнению с I_{i-1} его значением дискретно (на 5%) уменьшаются коэффициенты усиления $K3 - K6$, что ведет (согласно уравнениям 4, 5) к росту допустимых значений скольжения колесных пар $V_{ск}$. В противном случае коэффициенты $K3 - K6$ увеличиваются, т. е. уровень скольжения ограничивается на один шаг в противоположном направлении.

Кроме того, для исключения значительного роста величины скольжения при отсутствии максимума кривой крива (сильные масляные загрязнения) производится ограничение возможных диапазонов изменения коэффициентов усиления $K3 - K6$ в пределах $\pm 40\%$.

Таким образом, по максимуму кривой крива (рис. 4) настраиваются все контуры регулирования угловых скоростей вращения тяговых двигателей ТД1 – ТД6. Так, например, для тяговых двигателей ТД1 и ТД6 на рис. 4 показаны возможные динамические диапазоны изменения скольжения при настройке на максимальный коэффициент сцепления.

Эффективность предложенных алгоритмов управления исследовалась на математических моделях [13], подтвердивших целесообразность их применения.

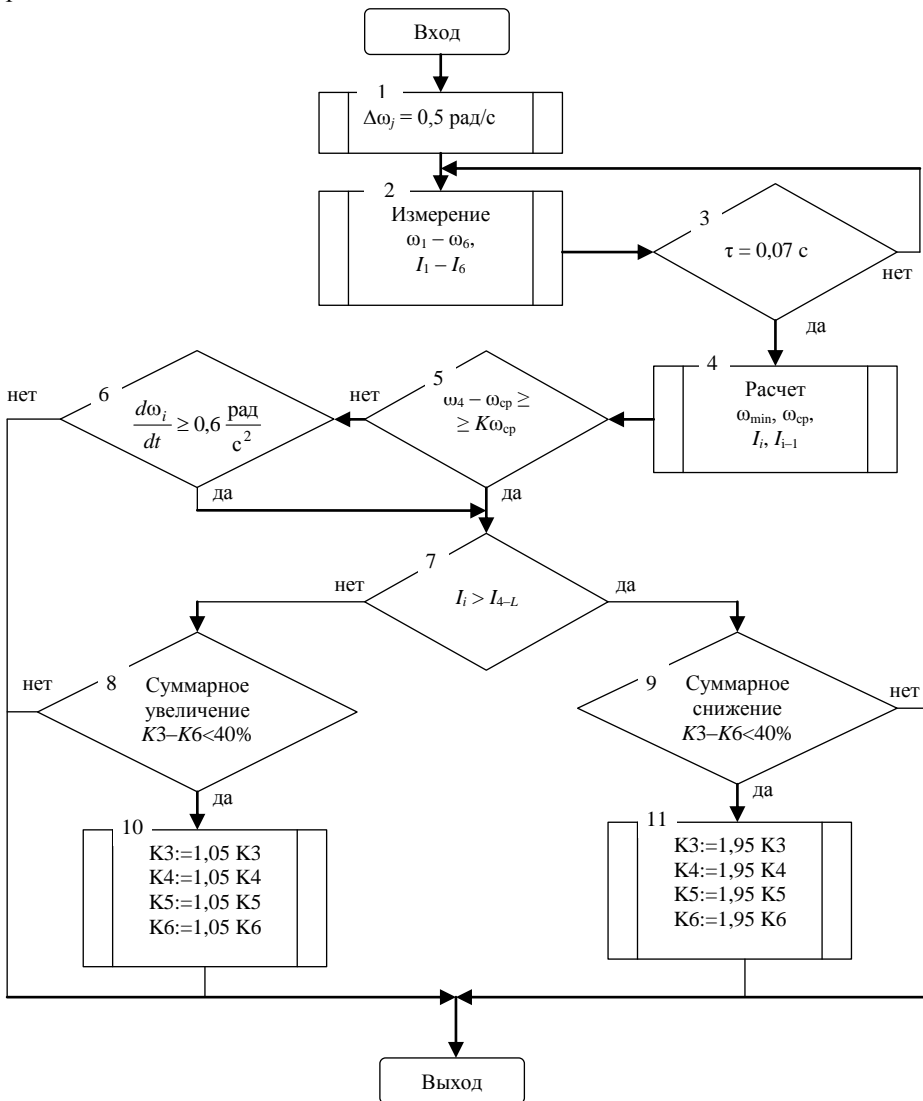


Рис. 3. Блок-схема алгоритма динамической настройки коэффициентов усиления $K3 - K6$ контуров регулирования скорости вращения тяговых двигателей согласно уравнению (5)

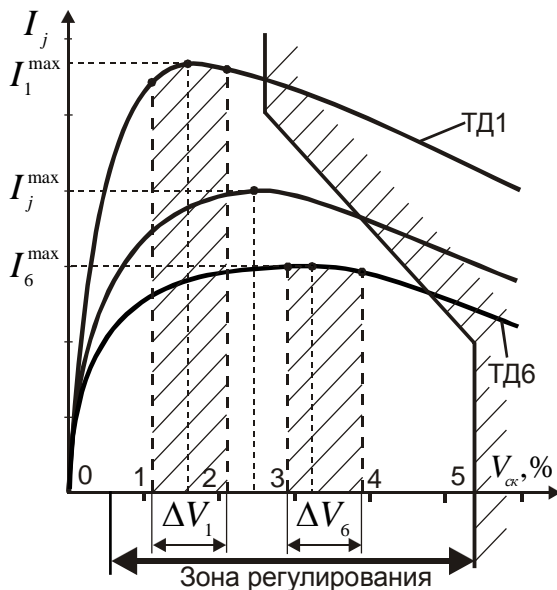


Рис. 4. Адаптивная настройка контуров регулирования угловых скоростей вращения тяговых двигателей на экстремум коэффициента сцепления: I_j – ток якоря j -го двигателя; I_1 , I_6 – токи якоря первого и шестого ТД; $V_{ск}$ – относительное скольжение; ΔV_1 , ΔV_6 – соответственно динамические диапазоны скольжений первой и шестой колёсных пар при изменении коэффициентов усиления $KЗ$ – $K6$

Выводы по данной работе и перспективы дальнейших исследований

1. Анализ путей повышения тягово-сцепных свойств современных локомотивов позволяет сделать выводы, что применяемые микропроцессорные системы управления и регулирования электропередач тепловозов должны решать значительно более широкие задачи, чем просто предупреждать возникновение и развитие процессов буксования. Поэтому в отличие от традиционных подходов создания таких систем, необходимо обеспечивать поосное регулирование тяговых двигателей и допускать их работу с различными токами и частотой вращения. Это позволит исключить влияние на тяговые и противобуксовочные свойства локомотивов расхождения диаметров колес, характеристик двигателей, загрязнений рельсов, атмосферных осадков и профиля пути, которые случайным образом влияют на характеристики сцепления. Кроме того, необходимо допускать для первых колесных пар (по ходу движения) более высокие уровни крипа с целью улучшения условий сцепления последующих колесных пар, на которые возможно перераспределять недоиспользованную мощность дизель-

генератора.

2. Перераспределение мощности между буксующими и небуксующими осями целесообразно осуществлять до тех пор, пока буксуют не более двух колесных пар. В противном случае необходимо производить общее снижение мощности дизель-генератора.

3. Многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов подтверждают, что микропроцессорные системы управления и регулирования электропередач кроме перечисленных выше свойств должны обеспечить эффективное управление подачей песка при буксовании. Эти проблемы требуют проведения дальнейших исследований, так как от их решения зависит износ бандажей колес и рельсов, который непосредственно влияет на эксплуатационные расходы железнодорожного транспорта.

Список литературы: 1. Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом. – К.: ВИПОЛ, 1993. – 448 с. 2. Гайдуков В.Е., Шумилин Г.Д., Филиппов Л.К. Унифицированное противобуксовочное устройство для магистральных тепловозов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1976. – №6. – С. 27 – 29. 3. Барский М.Р., Сердинова И.Н. Экспериментальное исследование процессов буксования и юза электровозов // Проблемы повышения эффективности работы транспорта. – М.: АН СССР, 1953. – Вып 1. – С. 130 – 180. 4. Бове Е.Г. Противобуксовочная защита на электровозах / Сб. Новое в устройстве и содержании электровозов и тепловозов. Трансжелдориздат, 1962. – С. 57 – 60. 5. Исаев И.П., Лужнов Ю.М. Проблемы сцепления колес локомотивов с рельсами. – М.: Машиностроение, 1985. – 238 с. 6. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. – М.: Транспорт, 1965. – 257 с. 7. Павленко А.П. Прогнозирование динамических качеств и оптимизация параметров систем "экипаж – тяговый привод – путь" перспективных локомотивов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1987. – 42 с. 8. Ohishi K., Ogawa Y. Adhesion control of electric motor coach based on force nontrol using disturbance observer // IEEE, Advanced Motion Control. – April, 2000. – P. 323 – 328. 9. Мейер Б. (Meyer V.) Локомотивы с высокими тягово-сцепными качествами и регулируемым крипом // Железные дороги мира. – 1989. – № 5. – С. 18 – 25. 10. Микропроцессорные системы автоматического регулирования электропередачи тепловозов / А.В. Гриценко, В.В. Грачев, С.И. Ким, Ю.И. Клименко и др. – М.: Маршрут, 2004. – 172 с. 11. Бауэр Х.П. Оптимальное использование сцепления на электровозе с трехфазным тяговым приводом // Железные дороги мира. – 1987. – № 8. – С. 10 – 23. 12. Клименко Ю.И. Исследование привода с изменяемой жесткостью тяговой характеристики. Дис. ... канд. техн. наук. – Коломна, ВНИТИ, 2004. – 174 с. 13. Тасанг Э.Х., Шапран Е.Н. Моделирование динамических процессов в электрических передачах тепловозов // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 3/1 (48). – С. 142 – 149.

Поступила в редакцию 28.03.2006