

УДК 681.51

И.А. Радионов

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО МОМЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ В КОНТАКТЕ
«КОЛЕСО–РЕЛЬС»***

Проблема формирования тяги локомотивом остается одной из важнейших в железнодорожном транспорте. Связано это со случайной составляющей коэффициента сцепления колесной пары (КП) с рельсовым полотном. Коэффициент сцепления меняется в зависимости от ряда факторов: погодные условия, качество покрытия, скорости движения и др. Формирование тяги зачастую производится автоматическими системами по линейной зависимости. Срыв сцепления определяется по производной угловой скорости вращения КП или сравнением скоростей вращения нескольких КП. После чего осуществляется сброс тяги. Данный подход имеет очевидные недостатки. В статье предлагается система оценки момента сцепления в контакте «колесо – рельс». Для построения наблюдателя применяются методы и принципы синергетической теории управления. В синергетической теории управления совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Инварианты выступают в роли цели управления, на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, при которых эти заданные инварианты выполняются. Наличие информации о текущих условиях сцепления позволит конструировать высокоточные адаптивные системы управления тяговым электроприводом локомотивов, решающих ряд задач: задачу энергосбережения; задачу поддержания требуемой или максимально допустимой скорости поступательного движения состава; задачу поддержания максимального коэффициента сцепления в контакте «колесо-рельс». Приведены результаты моделирования синтезированной системы оценки момента сцепления в контакте «колесо-рельс», которые свидетельствуют о выполнении поставленной цели; время переходного процесса составляет около 0,3 с.

Момент сцепления; система оценки; наблюдатель; синергетический подход.

I.A. Radionov

**THE METHOD OF ESTIMATION OF ADHESION AT "WHEEL–RAILWAY"
CONTACT POINT**

The problem of locomotive traction formation remains as one of the most important problems of railway transport. This is due to a random component in the friction coefficient describing wage wheels adhesion with the rail surface. The coefficient of adhesion varies depending on several factors: weather conditions, railway surface quality, speed, etc. Formation of the traction are often performed by automatic systems with use of a linear dependences. Fall of adhesion is determined by the derivative of angular velocity of wage wheels rotation or by comparing rotation speeds of several wage wheels. The follow-up traction decrease is usually implemented as a corrective measure. This approach has some obvious disadvantages. In the paper we propose a system of adhesion moment estimation in contact point if "wheel–railway". As a means for observer design we use methods and principles of the synergetic control theory. In the theory of synergetic control the set of criteria for the control system is usually expressed in the form of an appropriate system of invariants. Invariants play the role of control objectives, they enforced a given technological problem, and the synergetic synthesis procedure reduces to process of finding control laws, which these given invariants are satisfied. The availability of information about current adhesion conditions will allow to construction a high-precision adaptive control systems for locomotive electrical drives to solve a number of problems: the problem of energy saving; the problem of maintaining the required or maximum a train velocity; the problem of maintaining the maximum of adhesion coefficient in contact "wheel–railway". The results of the simulation of synthesized evaluation system torque adhesion in contact "wheel-rail", which indicate the implementation of this goal; the transition process is about 0,3 s.

Adhesion moment; evaluation system; observer; synergetic approach.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №13-08-00995-а).

Введение. Несмотря на достаточно долгую историю развития железнодорожного транспорта, проблема формирования тяги остается для него ключевой [1, 2]. Связано это с особенностями свойств сцепления колесной пары (КП) с рельсовым полотном. В случае превышения моментом тяги предельного значения момента сцепления развивается процесс боксования – чрезмерного проскальзывания колес относительно рельса, что негативно сказывается на тяговых свойствах локомотива [3–8]. В связи с этим конструирование регуляторов, позволяющих наиболее полно реализовать потенциальные свойства сцепления, ведет к повышению эффективности использования современных тяговых электроприводов.

Измерение текущего значения момента сцепления не представляется возможным. Традиционно на практике используются эмпирические зависимости силы сцепления от скорости движения состава для конкретных типов локомотивов [1, 2, 4]. Очевидно, что такой подход не позволяет реализовать режим максимальной тяги. В случае резкого снижения коэффициента сцепления развивается процесс боксования КП, появление которого определяют по скачкообразному изменению скорости или ускорения вращения КП. Наличие информации о текущих условиях сцепления КП с рельсовым полотном служит дополнительным вспомогательным условием, позволяющим системе управления тяговым электроприводом локомотива своевременно реагировать на изменение обозначенной величины и не допускать развитие процесса боксования [9], и неотъемлемым условием построения энергосберегающих систем регулирования тяговым электроприводом [10–13].

Цель данной работы состоит в синтезе системы оценки (наблюдателя) момента сцепления в контакте «колесо – рельс» с использованием методов и подходов синергетической теории управления (СТУ), которая базируется на принципах направленной самоорганизации и управляемой декомпозиции нелинейных систем [14–17].

Синтез наблюдателя. Совокупность критериев управления или набор желаний проектировщика системы в СТУ принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. При этом инварианты выступают как цель управления, на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи и (или) поддерживаются заданные энергетические (физические, химические и др.) соотношения, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, при которых эти заданные инварианты выполняются [14–17].

В качестве объекта исследования рассматривается тяговый АЭП I класса (опорно-осевой тяговый двигатель с опорно-осевым редуктором) АД917, устанавливаемый на магистральных тепловозах. Локомотив имеет шесть двигателей, по одному на КП с возможностью поосного регулирования силы тяги. Каждый привод оснащен датчиком частоты вращения и датчиком температуры статора и питается от собственного инвертора напряжения.

Математическая модель тягового двигателя составляется на основе анализа механической части электропривода, которая представляется как крутильная система, состоящая из КП и вращающихся масс привода, моменты инерции которых приведены к оси КП (рис. 1).

На рис. 1 обозначены: M_T – тяговый момент электропривода; $M_{сц}$ – момент сцепления колеса с поверхностью рельса; J_r, J_k – момент инерции ротора асинхронного тягового двигателя (АТД) и КП соответственно; φ_r, φ_k – угол поворота ротора АТД и КП относительно оси вращения соответственно; ω_r, ω_k – угловая скорость ротора и КП соответственно; X_k, V_k – перемещение КП и скорость этого перемещения вдоль направления движения локомотива; C_x – жесткость продольной связи КП с тележкой; c_m – жесткость связи КП с АТД; b_x – коэффициент демпфирования про-

дольной связи КП с тележкой; b_m – коэффициент демпфирования связи КП с АДД; m_k – масса колесной пары; $\Pi(t)$ – нагрузка от КП на путь [18].

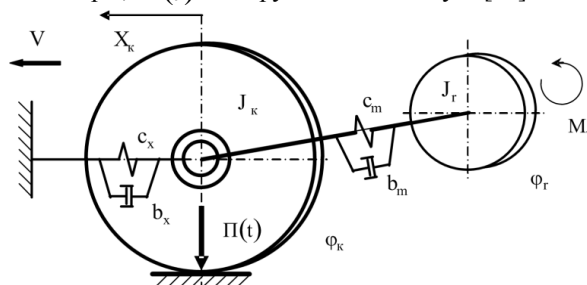


Рис. 1. Расчетная схема модели опорно-осевого тягового двигателя с опорно-осевым редуктором

Математическая модель, описывающая взаимодействие компонентов схемы на рис. 1, записанная с учетом динамики асинхронного электропривода, представляет собой систему дифференциальных уравнений (1). Для выполнения процедуры синтеза произведена замена момента сцепления в контакте «колесо – рельс» $M_{сц}$ на переменную y , а также добавлено уравнение ее производной.

При составлении уравнений использовались следующие обозначения: u_{sx} , u_{sy} и i_{sx} , i_{sy} – проекции напряжения и тока статора на оси вращающейся системы координат; ψ_r – модуль результирующего вектора потокоцепления ротора; L_s , L_r , L_m – собственные и взаимная индуктивности обмоток; r_s , r_r – их активные сопротивления; p – число пар полюсов; m – число фаз обмотки статора; K – коэффициент редуктора; $L = L_s L_r - L_m^2$; $L^* = (r_r L_m^2 + r_s L_r^2)(L_r L)$.

$$\begin{aligned}
 \frac{dy}{dt} &= 0; \\
 \frac{d\varphi_r}{dt} &= \omega_r; \quad \frac{d\varphi_k}{dt} = \omega_k; \quad \frac{dX_k}{dt} = V_k; \\
 J_k \frac{d\omega_k}{dt} &= -\frac{y}{K} - b_m(\omega_k K - \omega_r) - c_m(\varphi_k K - \varphi_r); \\
 m_k \frac{dV_k}{dt} &= \frac{y}{R_k K} - b_x V_k - c_x X_k; \\
 \frac{d\psi_r}{dt} &= \frac{r_r L_m}{L_r} i_{sx} - \frac{r_r}{L_r} \psi_r; \\
 J_r \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{pm L_m}{2L_r} \psi_r i_{sy} - b_m(\omega_r - \omega_k K) - c_m(\varphi_r - \varphi_k K); \\
 \frac{di_{sx}}{dt} &= -L^* i_{sx} + \omega_r p i_{sy} + \frac{r_r L_m}{L_r} \frac{i_{sy}^2}{\psi_r} + \frac{L_m r_r}{L_r L} \psi_r + \frac{L_r}{L} u_{sx}; \\
 \frac{di_{sy}}{dt} &= -L^* i_{sy} - \omega_r p i_{sx} - \frac{r_r L_m}{L_r} \frac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} - \frac{L_m}{L} \omega_r p \psi_r + \frac{L_r}{L} u_{sy}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Математическая модель асинхронного электропривода записана в системе координат, ориентированной по направлению вектора потокосцепления ротора при общепринятых физических допущениях:

- ◆ параметры обмоток фаз статора и ротора соответственно одинаковы, а система напряжений фаз симметрична;
- ◆ магнитопроводы ненасыщенны;
- ◆ воздушный зазор между взаимно перемещающимися частями равномерен;
- ◆ магнитодвижущая сила в воздушном зазоре синусоидальна;
- ◆ влияние потерь в стали и эффекта вытеснения тока и потока на характеристике АЭП не учитывается;
- ◆ обе части АЭП имеют однотипные распределенные обмотки.

Синтез наблюдателя строится в соответствии с методикой, описанной в работе [19–20].

Расширенная математическая модель системы представляется в виде

$$\begin{aligned}\mathbf{x}(t) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}),\end{aligned}\quad (2)$$

где \mathbf{x} – вектор наблюдаемых переменных размерности n ; \mathbf{y} – вектор ненаблюдаемых переменных размерности m ; \mathbf{u} – вектор управления размерности k ; $\mathbf{g}(\cdot)$ и $\mathbf{h}(\cdot)$ – непрерывные нелинейные вектор-функции. Задача сводится к построению асимптотической оценки вектора \mathbf{y} по наблюдаемым значениям вектора \mathbf{x} и известному вектору \mathbf{u} .

В частном случае, когда векторы \mathbf{g} и \mathbf{h} – линейные функции вектора \mathbf{y} , систему (2) можно представить в виде

$$\begin{aligned}\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) &= \mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x})\mathbf{y}; \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) &= \mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x})\mathbf{y},\end{aligned}\quad (3)$$

где $\mathbf{G}_1(\mathbf{x})$ – функциональная матрица $n \times m$; $\mathbf{H}_1(\mathbf{x})$ – функциональная матрица $m \times m$.

Процедура синтеза сводится к вычислению уравнений:

$$\mathbf{H}_1^T(\mathbf{x}) - \mathbf{G}_1^T \Gamma^T(\mathbf{x}) = \mathbf{L}^T,$$

где числовая матрица $\mathbf{L}(\mathbf{x})$ размерностью $m \times m$ выбирается такой, чтобы решение $\boldsymbol{\psi} = 0$ было асимптотически устойчиво в целом. При этом вектор $\boldsymbol{\psi}(t)$ удовлетворяет однородному дифференциальному уравнению $\dot{\boldsymbol{\psi}}(t) = \mathbf{L}(\mathbf{x})\boldsymbol{\psi}$.

Матрица $\Gamma(\mathbf{x})$ может быть найдена с помощью различных методов модального управления. После ее определения можно записать вектор $\boldsymbol{\gamma}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$:

$$\boldsymbol{\gamma}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \Gamma(\mathbf{x})\mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}).$$

После чего составляются уравнения наблюдателя:

$$\begin{aligned}\mathbf{z} &= \mathbf{Lz} - \mathbf{L} \int_0^x \Gamma(\mathbf{x}) d\mathbf{x} - \mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \Gamma(\mathbf{x})\mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \\ \mathbf{y} &= \int_0^x \Gamma(\mathbf{x}) d\mathbf{x} - \mathbf{z}.\end{aligned}$$

Запишем матрицы $\mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u})$; $\mathbf{G}_1(\mathbf{x})$; $\mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u})$; $\mathbf{H}_1(\mathbf{x})$ для рассматриваемого случая:

$$\mathbf{G}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_\kappa K} & \frac{1}{m_\kappa R_\kappa K} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0, \quad \mathbf{G}_1(\mathbf{x}) = 0;$$

$$\mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_\kappa \\ V_\kappa \\ \frac{1}{J_\kappa}(-b_m(\omega_\kappa K - \omega_r) - c_m(\phi_\kappa K - \phi_r)) \\ \frac{1}{m_\kappa}(-b_x V_\kappa - c_x X_\kappa) \\ \frac{r_r L_m i_{sx}}{L_r} - \frac{r_r}{L_r} \psi_r \\ \frac{1}{J_r} \left(\frac{pmL_m}{2L_r} \psi_r i_{sy} - b_m(\omega_r - \omega_\kappa K) - c_m(\phi_r - \phi_\kappa K) \right) \\ -L^* i_{sx} + \omega_r p i_{sy} + \frac{r_r L_m i_{sy}^2}{L_r \psi_r} + \frac{L_m r_r}{L_r L} \psi_r + \frac{L_r}{L} u_{sx} \\ -L^* i_{sy} - \omega_r p i_{sx} - \frac{r_r L_m i_{sx} i_{sy}}{L_r \psi_r} - \frac{L_m}{L} \omega_r p \psi_r + \frac{L_r}{L} u_{sy} \end{bmatrix}.$$

Числовые устойчивые матрицы $\mathbf{L}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ и $\mathbf{\Gamma}(\mathbf{x})$ находятся путем решения следующего уравнения:

$$0 - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_\kappa K} & \frac{1}{m_\kappa R_\kappa K} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \Gamma_3 \\ \Gamma_3 \\ \Gamma_4 \\ \Gamma_5 \\ \Gamma_6 \\ \Gamma_7 \\ \Gamma_9 \end{bmatrix} = \mathbf{L}(\mathbf{x}, \mathbf{u}). \quad (4)$$

Выбрав матрицу $\mathbf{L}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = l_1$, $l_1 < 0$, зададим матрицу $\mathbf{\Gamma}(\mathbf{x})$, записав уравнение (4) в виде

$$\frac{\Gamma_2}{J_\kappa K} - \frac{\Gamma_3}{m_\kappa R_\kappa K} = l_1.$$

$$\text{Матрица } \mathbf{\Gamma}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_1 m_\kappa R_\kappa K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далее вычислим интеграл от $\mathbf{\Gamma}(\mathbf{x})$ по $d\mathbf{x}$

$$P = \int_0^{\mathbf{x}} \mathbf{\Gamma}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_0^{V_\kappa} -l_1 m_\kappa R_\kappa K dV_\kappa = -l_1 m_\kappa R_\kappa K V_\kappa.$$

Выполнив необходимые подстановки, запишем уравнения наблюдателя $\hat{M}_{сн}$:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= l_1 z + l_1^2 m_{\kappa} R_{\kappa} V_{\kappa} K + l_1 R_{\kappa} K (b_x V_{\kappa} + c_x X_{\kappa}); \\ \hat{M}_{\text{сц}} &= -l_1 m_{\kappa} R_{\kappa} V_{\kappa} K - z. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из выражения (5), величина момента сопротивления не зависит от динамики электропривода и может быть вычислена с использованием переменной X_{κ} и ее производной.

Экспериментальные исследования. Для оценки работы наблюдателя проведем моделирование системы (1), (5). Рассмотрим случай ступенчатого изменения момента сцепления в контакте «колесо – рельс» ($M_{\text{ном}} = 11500 \text{ Н} \cdot \text{м}$):

$$M_c = \begin{cases} M_{\text{ном}}, & \text{при } t < 5 \text{ с}; \\ 0,8M_{\text{ном}}, & \text{при } 5 \text{ с} \leq t < 10 \text{ с}; \\ 0,4M_{\text{ном}}, & \text{при } 10 \text{ с} \leq t < 15 \text{ с}; \\ 0,3M_{\text{ном}}, & \text{при } 15 \text{ с} \leq t < 20 \text{ с}; \\ 0,6M_{\text{ном}}, & \text{при } 20 \text{ с} \leq t < 25 \text{ с}; \\ 0,9M_{\text{ном}}, & \text{при } t \geq 25 \text{ с}. \end{cases}$$

Параметры системы (1) выбраны следующими: $R_{\kappa} = 0,525 \text{ м}$; $J_{\kappa} = 202 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_r = 412 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $m_{\kappa} = 2790 \text{ кг}$; $c_m = 3500 \text{ кН/м}$; $b_m = 10 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$; $c_x = 50000 \text{ кН/м}$; $b_x = 400 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$; $\Pi = 235,4 \text{ кН}$; $K = 3,65$; $f_1 = 23,5 \text{ Гц}$; $r_s = 0,0327 \text{ Ом}$; $r_r = 0,0302 \text{ Ом}$; $L_r = L_s = 0,013 \text{ Гн}$; $L_m = 0,0124 \text{ Гн}$; $l_1 = -40$.

По графикам на рис. 2 и 3 можно сделать вывод о приемлемой работе наблюдателя: время переходного процесса составляет около 0,3 с; и для идеального случая, когда после скачкообразного изменения нагрузки, ее величина остается постоянной, погрешность составляет около 0,005%. В реальной системе столь низкого значения погрешности добиться не удастся в связи с непрерывно изменяющимися условиями сцепления, допущениями математической модели, с несовершенством измерительных и вычислительных средств, необходимостью применения алгоритмов сглаживания и фильтрации поступающего сигнала.

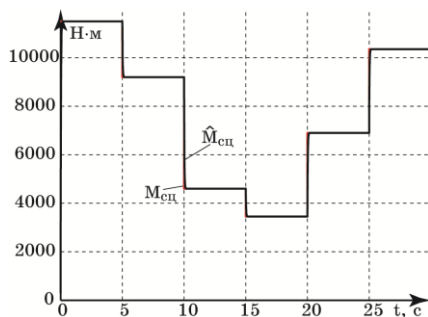


Рис. 2. Изменение момента сцепления в контакте «колесо – рельс» при ступенчатом изменении коэффициента сцепления

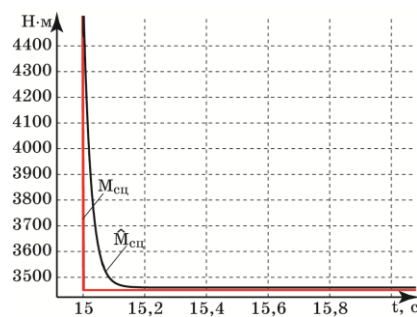


Рис. 3. Эталонное и наблюдаемое значение момента сцепления в контакте «колесо – рельс»

Далее приведем результат оценки момента сцепления для случая, когда указанная переменная обладает гармонической составляющей: амплитуда колебаний составляет 10 % от $M_{ном}$, а частота – 10 Гц (рис. 4 и 5).

Результат работы наблюдателя предскажем. Запоздывание оценки составляет 0,3 с, необходимо усреднение вычисляемой величины.

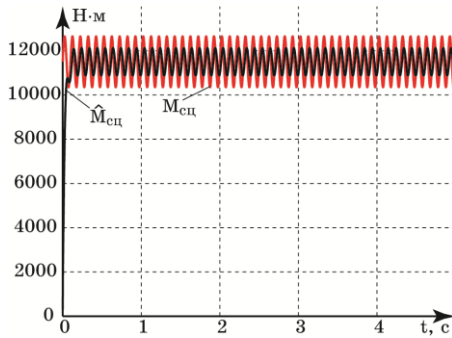


Рис. 4. Изменение момента сцепления в контакте «колесо – рельс» при гармоническом изменении коэффициента сцепления

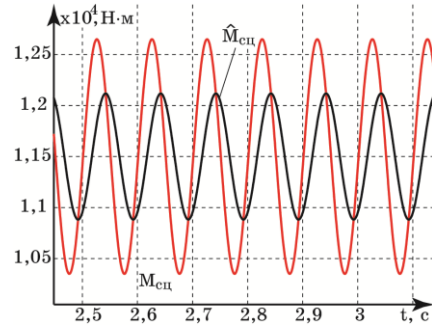


Рис. 5. Эталонное и наблюдаемое значение момента сцепления в контакте «колесо – рельс»

Заключение. В статье с использованием синергетического подхода предложено решение проблемы оценки переменных состояния асинхронного тягового электропривода, не подлежащих непосредственному измерению, в данном случае – момента сцепления в контакте «колесо – рельс». Важной особенностью данного метода является то, что все величины, присутствующие в правых частях выражений (5), либо известны, либо подлежат непосредственному измерению. Так как на практике часто используются в качестве наблюдателей выражения, стоящие в правой части уравнений (1) (например, при оценке потокосцепления ротора), предложенный метод выгодно отличается, отсутствием погрешностей, вызванных интегрированием искомой величины и необходимостью наличия информации о начальных условиях. Данный метод был применен автором [21] при построении системы оценки составляющих вектора потокосцепления ротора, которые необходимы для синтеза векторного регулятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савоськин А.Н., Ляпушкин Н.Н., Чучин А.А. Уточнение модели взаимодействия колеса локомотива с рельсом на основе дислокационной теории пластического течения металлов // Транспорт Урала. – 2010. – № 2. – С. 69-74.
2. Самме Г.В. Новые результаты в теории сцепления локомотива // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3 (28). – С. 14-16.
3. Савоськин А.Н., Ляпушкин Н.Н., Чучин А.А. Моделирование процесса сцепления колеса локомотива с рельсом // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 6 (31). – С. 50-53.
4. Ковалев Р.В., Матюшков С.Ю., Пугачев А.А., Rogovcev Г.В., Федяева Г.А. Совершенствование системы управления тяговым электроприводом грузового локомотива // Известия Тульского государственного университета. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 2. – С. 109-114.
5. Логинова Е.Ю., Кофанов В.А. Моделирование механических свойств асинхронного тягового привода тепловоза при плохих условиях сцепления // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 3. – С. 6-9.
6. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit // Wear. – March 2005. – Vol. 258, Issues 7–8. – P. 992-1000.
7. Wenlia L., Leitingb Z., Kan D. Performance Analysis of Re-adhesion Optimization Control Based On Full-dimension State Observer // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 23. – P. 531-536.

8. *Spiryagin M., Lee K.S., Yoo H.H.* Control system for maximum use of adhesive forces of a railway vehicle in a tractive mode // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – April 2008. – Vol. 22, Issue 3. – P. 709-720.
9. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A.* Synergetic control of asynchronous electric traction drives of locomotives // *Journal of computer and systems sciences international*. – July 2014. – Vol. 53, Issue 4. – P. 587-600.
10. *Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S* Synergetic synthesis of power saving control for locomotive asynchronous drive systems // *Proceedings of 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT-2014)*, 6-8 October 2014, St. Petersburg, Russia. – P. 546-550.
11. *Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А.* Энергосберегающее управление асинхронным тяговым двигателем: синергетический подход // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2013. – № 2 (143). – С. 18-22.
12. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S* Adaptive power saving control for traction asynchronous electrical drive: synergetic approach // *(ENERGYCON 2014) Book Series: IEEE International Energy Conference*. – 2014. – P. 1446-1453.
13. *Попов А.Н.* Синергетический подход к синтезу законов энергосберегающего управления техническими системами // *Нелинейный мир*. – 2005. – № 3. – С. 38-45.
14. *Колесников А.А.* Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // *Известия ТРТУ*. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
15. *Kolesnikov A., Veselov G., Popov A., Kolesnikov A., Kuzmenko A., Dougal R.A., Kondratiev I.* Synergetic approach to the modeling of power electronic systems // *7th Workshop on Computers in Power Electronics*; Blacksburg, VA, USA; 16 July 2000 through 18 July 2000. – P. 259-262.
16. *Kuz'menko A.A.* Nonlinear adaptive control of a shipboard power plant turbine // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – July 2012. – Vol. 51, Issue 4. – P. 512-525.
17. *Kuz'menko A.A.* Synergetics approach to multi-machine power system hierarchical nonlinear control // *2013 5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2013*; Almaty; Kazakhstan; 10 September 2013 through 12 September 2013. Article number 6798419. – P. 146-150.
18. *Коропец П.А.* Флаттер в тяговом приводе локомотива в режиме буксования // *Исследовано в России*. – 2009. – № 12. – С. 716-772.
19. *Колесникова А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
20. *Колесников А.А., Балалаев Н.В., Веселов Г.Е., Топчиев Б.В.* Методы синергетического синтеза адаптивных регуляторов // *Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов / под ред. А.А. Колесникова*. – М.: Физматлит, 2004. – С. 204-226.
21. *Радионов И.А.* Синергетический синтез векторной системы управления асинхронным электроприводом // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 6 (119). – С. 246-254.

REFERENCES

1. *Savos'kin A.N., Lyapushkin N.N., Chuchin A.A.* Utochnenie modeli vzaimodeystviya koleasa lokomotiva s rel'som na osnove dislokatsionnoy teorii plasticheskogo techeniya metallov [Clarification of the interaction model the wheels of a locomotive and a rail on the basis of the dislocation theory of plastic flow of metals], *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2010, No. 2, pp. 69-74.
2. *Samme G.V.* Novye rezul'taty v teorii stsepleniya lokomotiva [New results in the theory of adhesion of the locomotive], *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2010, No. 3 (28), pp. 14-16.
3. *Savos'kin A.N., Lyapushkin N.N., Chuchin A.A.* Modelirovanie protsessa stsepleniya koleasa lokomotiva s rel'som [Modeling of wheel adhesion locomotive with rail], *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2010, No. 6 (31), pp. 50-53.
4. *Kovalev R.V., Matyushkov S.Yu., Pugachev A.A., Rogovtsev G.V., Fedyaeva G.A.* Sovershenstvovanie sistemy upravleniya tyagovym elektroprivodom gruzovogo lokomotiva [The improvement of the management system of traction electric freight locomotive], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya of the Tula State University], 2010, Issue 3, Part 2, pp. 109-114.
5. *Loginova E.Yu., Kofanov V.A.* Modelirovanie mekhanicheskikh svoystv asinkhronnogo tyagovogo privoda teplovoza pri plokhikh usloviyakh stsepleniya [Modeling of mechanical properties of asynchronous traction drive of the locomotive under poor traction], *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, No. 3, pp. 6-9.

6. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit, *Wear*, March 2005, Vol. 258, Issues 7–8, pp. 992-1000.
7. Wenlia L., Leitngb Z., Kan D. Performance Analysis of Re-adhesion Optimization Control Based On Full-dimension State Observer, *Procedia Engineering*, 2011, Vol. 23, pp. 531-536.
8. Spiryagin M., Lee K.S., Yoo H.H. Control system for maximum use of adhesive forces of a railway vehicle in a tractive mode, *Mechanical Systems and Signal Processing*, April 2008, Vol. 22, Issue 3, pp. 709-720.
9. Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A. Synergetic control of asynchronous electric traction drives of locomotives, *Journal of computer and systems sciences international*, July 2014, Vol. 53, Issue 4, pp. 587-600.
10. Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S Synergetic synthesis of power saving control for locomotive asynchronous drive systems, *Proceedings of 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT-2014)*, 6-8 October 2014, St. Petersburg, Russia, pp. 546-550.
11. Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A. Energoberegayushchee upravlenie asinkhronnym tyagovym dvigatelom: sinergeticheskiy podkhod [Energy-efficient management of asynchronous traction motor: a synergistic approach], *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2013, No. 2 (143), pp. 18-22.
12. Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S Adaptive power saving control for traction asynchronous electrical drive: synergetic approach, *(ENERGYCON 2014) Book Series: IEEE International Energy Conference*, 2014, pp. 1446-1453.
13. Popov A.N. Sinergeticheskiy podkhod k sintezu zakonov energoberegayushchego upravleniya tekhnicheskimi sistemami [Synergetic approach to the synthesis of energy-saving laws of technical systems], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2005, No. 3, pp. 38-45.
14. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya kontseptsiya sistemnogo sinteza: edinstvo protsessov samoorganizatsii i upravleniya [Synergetic concept of system synthesis: the unity of the processes of self-organization and management], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSUR], 2006, No. 6 (61), pp. 10-38.
15. Kolesnikov A., Veselov G., Popov A., Kolesnikov A., Kuzmenko A., Dougal R.A., Kondratiev I. Synergetic approach to the modeling of power electronic systems, *7th Workshop on Computers in Power Electronics; Blacksburg, VA, USA; 16 July 2000 through 18 July 2000*, pp. 259-262.
16. Kuz'menko A.A. Nonlinear adaptive control of a shipboard power plant turbine, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, July 2012, Vol. 51, Issue 4, pp. 512-525.
17. Kuz'menko A.A. Synergetics approach to multi-machine power system hierarchical nonlinear control, *2013 5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2013; Almaty; Kazakhstan; 10 September 2013 through 12 September 2013. Article number 6798419*, pp. 146-150.
18. Koropets P.A. Flatter v tyagovom privode lokomotiva v rezhime buksovaniya [Flutter in the traction drive of the locomotive in the mode of slipping], *Issledovano v Rossii* [Investigated in Russia], 2009, No. 12, pp. 716-772.
19. Kolesnikova A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory], Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
20. Kolesnikov A.A., Balalaev N.V., Veselov G.E., Topchiev B.V. Metody sinergeticheskogo sinteza adaptivnykh regulyatorov [Methods of synergetic synthesis of adaptive controllers], *Sinergetika i problemy teorii upravleniya: sbornik nauchnykh trudov* [Synergetics and problems of control theory: proceedings of], Under ed. A.A. Kolesnikova. Moscow: Fizmatlit, 2004, pp. 204-226.
21. Radionov I.A. Sinergeticheskiy sintez vektornoy sistemy upravleniya asinkhronnym elektroprivodom [Synergistic synthesis of induction motor vector control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 246-254.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Б. Чернышев.

Радионо́в Иван Алексе́евич – Южный федеральный университет; e-mail: i.a.radionov@gmail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634360707; кафедра СИПУ; ассистент.

Radionov Ivan Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: i.a.radionov@gmail.ru; 2, Chehov street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634360707; the department of SCP; assistant.