

3. *Nasuti F.W.* Knowledge Acquisition Using Multiple Domain Experts in the Design and Development of an Expert System for Disaster Recovery Planning, *Dissertation Submitted to Nova Southeastern University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy*, 2000. Available at: [http://www.scis.nova.edu/~nasutif/formal\\_proposal.pdf/](http://www.scis.nova.edu/~nasutif/formal_proposal.pdf/).
4. *Erdani Y.* Acquisition of Human Expert Knowledge for Rule-based Knowledge-based Systems using Ternary Grid, *Dissertation Submitted to Duisburg-Essen University for the Degree of Dr.Sci.Tech.*, 2005. Available at: <http://www.worldcat.org/title/acquisition-of-human-expert-knowledge-for-rule-based-knowledge-based-systems-using-ternary-grid/oclc/179762167>.
5. *Zaied A.N.H., Aal S.I.A., Hassan M.M.* Rule-based Expert Systems for Selecting Information Systems Development Methodologies, *IJ. Intelligent Systems and Applications*, 2013, Vol. 9, pp. 19-26. Available at: URL: <http://www.mecspress.org/ijisa/ijisa-v5-n9/IJISA-V5-N9-3.pdf>.
6. *Kadhim M.A., Alam M.A., Kaur H.* A Multi-intelligent Agent Architecture for Knowledge Extraction: Novel Approaches for Automatic Production Rules Extraction, *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2014, Vol. 9, No. 2, pp. 95-114. Available at: <http://dx.doi.org/10.14257/ijmue.2014.9.2.10/>.
7. *Nissen M., Kamel M., Sengupta K.* Integrated Analysis and Design of Knowledge Systems and Processes, *Information Resources Management Journal (IRMJ)*, Jan. 1, 2000, Vol. 13, Issue 1, pp. 24-42. Available at: <http://www.igi-global.com/article/integrated-analysis-design-knowledge-systems/1206/>.
8. *Bullinaria J.A.* IAI: Expert Systems, *Official site*: U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, 2013. Available at: <http://www.osti.gov/eprints/topicpages/documents/record/832/1522968.html>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Гуда.

**Целых Александр Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ant@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; д.т.н.; профессор.

**Целых Лариса Анатольевна** – Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ); e-mail: larisa@tgn.sfedu.ru; 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: +79897207928; кафедра менеджмента; к.э.н.; доцент.

**Tselykh Alexander Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: ant@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; professor.

**Tselykh Larisa Anatolievna** – Chekhov Taganrog Institute (branch) of Rostov State University of Economics; e-mail: larisa@tgn.sfedu.ru; 48, Initsiativnaya street, Taganrog, 347936, Russia; phone: +79897207928; the department of management; cand. of ec. sc.; associate professor.

УДК 681.51

**А.Н. Попов, И.А. Радионов**

### **АНТИБОКСОВОЧНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РЕЛЬСОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА\***

*Рассматривается актуальная проблема синтеза регулятора тяги в системе «тяговый привод – колесная пара (КП) – путь». В указанной системе имеет место процесс бокования, представляющий собой чрезмерное проскальзывание КП относительно рельсового полотна. Данный эффект негативно сказывается на тяговых свойствах локомотива, а также увеличивает износ КП и поверхности рельса. Основные современные методы решения данной задачи строятся на принципах увеличения коэффициента сцепления в контакте*

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

*«колесо – рельс» и отслеживания ускорения угловой скорости вращений КП, что позволяет судить о развитии процесса боксования. Используемые методы не способны формировать максимальный момент тяги в условиях изменяющегося коэффициента сцепления. Предлагается новый подход к синтезу регуляторов тяги, основанный на методах синергетической теории управления, который базируется на принципах направленной самоорганизации и управляемой декомпозиции нелинейных систем. Синтезированный регулятор обеспечивает заданную скорость скольжения КП относительно полотна рельса, тем самым реализуя режим максимальной тяги локомотива.*

*Боксование; регулирование тяги; синергетический синтез регуляторов; подвижный состав.*

**A.N. Popov, I.A. Radionov**

### **ANTI-SLIPAGE CONTROL SYSTEMS FOR RAILWAY ROLLING STOCK**

*In the paper we explore the urgent problem of traction control design for system “traction drive, wage wheels and surface of track”. In this object there are process of wheel slippage, which represents an excessive slippage of the wheelset relative to the rail surface. This process affect locomotive traction properties as well as increase a wear of wage wheels and rail surface. Main modern methods, that were used for this problem solution, base on increasing of friction factor at “wheel-track” contact point; and monitoring of wage wheels rotation angular velocity acceleration; this approach allows estimating the development of slippage phenomena. The methods used are not capable of forming the maximum torque traction in changing the coefficient of friction. The problem of synthesis of control algorithms in such systems can be successfully solved by using a synergistic approach, based on the principles of self-directed and controlled decomposition of nonlinear systems. In the paper we propose the regulator that keeps the desired speed of wage wheels slippage according the track, which provides implementation of maximum trust mode of operation.*

*Slippage; traction control; synergistic control synthesis; rolling stock.*

**Введение.** Несмотря на достаточно долгую историю железнодорожного транспорта, проблема формирования тяги остается для него ключевой. Связано это с особенностями свойств сцепления колесной пары (КП) с рельсовым полотном. В случае превышения момента тяги предельного значения момента сцепления, развивается процесс боксования – чрезмерного проскальзывания колес относительно рельса, что негативно сказывается на тяговых свойствах локомотива. В связи с этим, конструирование регуляторов, позволяющих наиболее полно реализовать потенциальные свойства сцепления, позволяет более эффективно использовать современные тяговые электроприводы (ТЭП).

Сложность задачи состоит как в высокоточном регулировании ТЭП, так и в том, что система «тяговый привод – КП – путь» обладает единственным каналом управления, воздействуя через который необходимо поддерживать требуемую скорость движения состава и обеспечивать защиту от боксования. На сегодняшний день, в нашей стране нет систем автоматического регулирования ТЭП, способных решить обозначенную задачу.

Важно подчеркнуть, что поступательное движение состава может осуществляться только при наличии проскальзывания КП относительно полотна рельса. Причем для поддержания режима максимальной тяги, скорость скольжения необходимо держать в требуемом диапазоне, иначе, в случае уменьшения величины скольжения ниже необходимого значения, реализовать максимальную тягу не представляется возможным, а в случае превышения величины скольжения критического значения – развивается процесс боксования КП [1–6].

Исследование скольжения колес относительно рельсового полотна подводит к необходимости учета различных внешних факторов, влияющих на качество сцепления, и детального рассмотрения процессов, происходящих в контакте «колесо –

рельс». Последнему вопросу посвящено значительно количество публикаций. Среди наиболее видных отечественных ученых, занимающихся решением указанной проблемы можно отметить И.П. Исаева, Н.Н. Меншутина, Д.К. Минова, Ю.М. Лужнова, А.Н. Коняева, А.Я. Когана, А.Л. Голубенко, А.Л. Лисицына [1–3]. Тем не менее, несмотря на колоссальный объем работы, выполненный в данном направлении, вопросы наиболее эффективного формирования тяги в системе «тяговый привод – КП – путь», а также механизмы взаимодействия колеса с рельсом и их количественные характеристики остаются открытыми и занимают исследователей и в настоящее время [4–6].

Большинство проводимых в этом направлении работ посвящены определению величин коэффициента тяги конкретных типов локомотивов в зависимости от скорости движения. Эти характеристики традиционно используются при проведении тягово-эксплуатационных расчетов и рекомендуются машинистам при выборе силы тяги в различных режимах движения состава [3, 7]. Значительное число работ посвящено изучению коэффициента фрикционного взаимодействия колеса с рельсом: влиянию загрязнения поверхности рельса, зависимости продольного и поперечного вращательного скольжения, свойств материалов колеса и рельса, а также влияния погодных условий на качество сцепления [4, 5].

Тем не менее, на практике используются эмпирические зависимости силы сцепления от скорости движения состава для конкретных типов локомотивов [3]. В работах П.Г. Колпахчяна [8] указывается на то, что значение момента тяги, которое необходимо поддерживать системой автоматического управления ТЭП локомотива, выбирается машинистом на основании визуальной оценки качества сцепления рельсового полотна, либо автоматически, с использованием полученных ранее экспериментальных данных. Очевидно, что такой подход не позволяет реализовать режим максимальной тяги локомотива.

Для случая движения состава с постоянной скоростью, наиболее распространенным способом защиты от боксования является следующая последовательность действий. Выделяются КП с наименьшей скоростью вращения, и ее частота вращения принимается за «эталонную». В случае если скорость вращения остальных КП превышает «эталонное» значение на заданную величину – осуществляется сброс тяги для отдельных КП. Помимо этого отслеживается угловое ускорение КП. Если ускорение превышает определенное значение, подается сигнал о развитии процессов боксования, для предотвращения которых выполняется сброс тяги [9]. Также существует возможность сравнения скорости вращения КП и приведенного значения угловой скорости, принимаемого за эталонное и рассчитанного исходя из текущей поступательной скорости движения состава.

В настоящей статье рассматривается задача управления тягой в системе «тяговый привод – КП – путь» в условиях резко меняющихся характеристик сцепления. Целью управления является поддержание заданного значения скорости скольжения КП относительно полотна рельса. Для решения поставленной задачи управления будем использовать синергетический подход и разработанный в его рамках метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который базируется на принципах направленной самоорганизации и управляемой декомпозиции нелинейных динамических систем [10, 11].

**Математическая модель.** В качестве объекта регулирования рассматривается механическая часть тягового электропривода I класса (опорно-осевого тягового двигателя с опорно-осевым редуктором), представляемая как крутильная система, состоящая из КП и вращающихся масс привода, моменты инерции которых приведены к оси КП (рис. 1) [12]. Введены следующие обозначения:  $M_T$  – тяговый мо-

мент электропривода;  $J_r, J_k$  – моменты инерции ротора ТЭП и КП соответственно;  $\varphi_r, \varphi_k$  – углы поворота ротора и КП относительно оси вращения соответственно;  $\omega_r, \omega_k$  – угловые скорости ротора и КП соответственно;  $X_k, V_k$  – перемещение КП и скорость перемещения вдоль направления движения локомотива;  $c_x$  – жесткость продольной связи КП с тележкой;  $c_m$  – жесткость связи КП с тяговым двигателем;  $b_x$  – коэффициент демпфирования продольной связи КП с тележкой;  $b_m$  – коэффициент демпфирования связи КП с тяговым двигателем;  $\Pi(t)$  – нагрузка КП на путь.

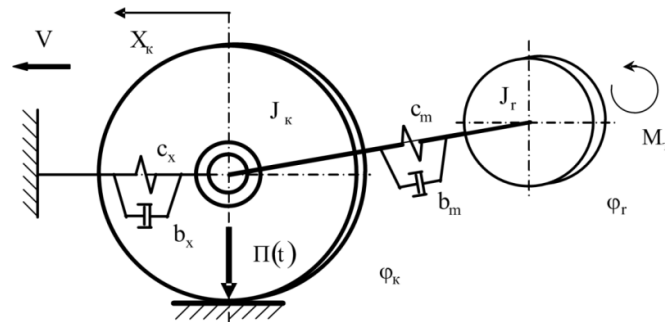


Рис. 1. Схема системы «тяговый привод – колесная пара – путь»

Математическая модель, описывающая представленную систему и включающую уравнение движения подвижного состава имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_k}{dt} &= \omega_k; \quad \frac{d\varphi_r}{dt} = \omega_r; \quad \frac{dX_k}{dt} = V_k; \\ J_k \frac{d\omega_k}{dt} &= -\frac{M_{cy}}{K} - b_m(\omega_k K - \omega_r) - c_m(\varphi_k K - \varphi_r); \\ m_k \frac{dV_k}{dt} &= \frac{M_{cy}}{R_k K} - b_x V_k - c_x X_k; \\ J_r \frac{d\omega_r}{dt} &= M_T - b_m(\omega_r - \omega_k K) - c_m(\varphi_r - \varphi_k K); \\ m_0 \frac{dV}{dt} &= \frac{1}{R_r} (k_1 M_{cy} - (k_2 V + k_3 V^2)) \Pi, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M_{cy}$  – момент сцепления КП с поверхностью рельса;  $m_k, m_0$  – масса, прикладываемая к одной КП и масса всего подвижного состава (локомотива) соответственно;  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты, зависящие от характеристик подвижного состава;  $V$  – скорость поступательного движения подвижного состава.

Действующая на состав результирующая сила записана выражением, представляющим собой произведение веса локомотива на удельное сопротивление движению, получаемое в общем случае экспериментально.

Момент сцепления  $M_{сц}$  задается следующим выражением:

$$M_{сц} = R_{к} \Pi \psi_{сц} k_{\psi}. \quad (2)$$

Характеристика сцепления представляется как безразмерная величина  $k_{\psi}$ , зависящая от относительной скорости скольжения  $\varepsilon$  КП (рис. 2) [5].

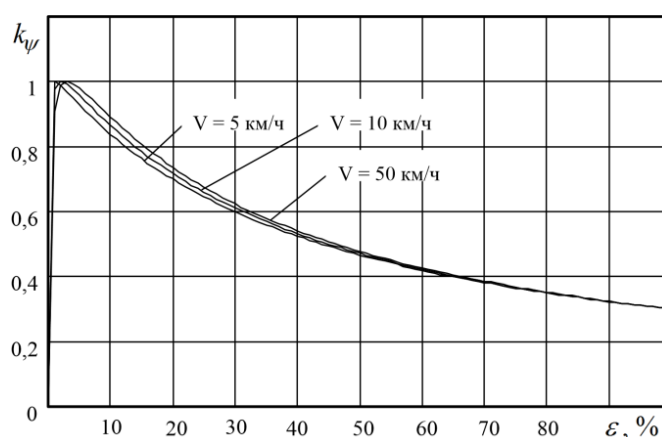


Рис. 2. Зависимость безразмерной характеристики сцепления от скорости скольжения КП

Данную характеристику можно аппроксимировать, записав в виде выражения

$$k_{\psi} = \begin{cases} 0,5 \varepsilon & \text{при } 0 \leq \varepsilon < 2; \\ 1 - 0,0125 (\varepsilon - 2) & \text{при } 2 \leq \varepsilon < 42; \\ 0,5 - 0,0086 (\varepsilon - 42) & \text{при } \varepsilon \geq 42. \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициент сцепления  $\psi_{сц}$  задается уравнением, описывающим его зависимость от скорости поступательного движения состава

$$\psi_{сц} = 0,28 + \frac{3}{50 + 72V} - 0,00252V. \quad (4)$$

Режим реализации максимальной тяги начинается с обычного устойчивого режима тяги, когда точка равновесия находится на восходящем участке характеристики сцепления (рис. 2) и не выходит за его пределы. В момент, когда точка равновесия окажется в положении, соответствующему максимуму величины  $k_{\psi}$  происходит срыв сцепления и развитие боксования [4, 5].

Представленные выше тезисы о характеристике сцепления колес с поверхностью рельса носят достаточно общий характер, тем не менее, вполне пригодны для исследования процессов боксования. На рис. 3 и 4 представлено моделирование системы (1)–(4) при линейном увеличении момента тяги, что приводит к «срыву» сцепления: снижению момента сцепления и скорости поступательного движения подвижного состава, а также увеличению скорости вращения КП.

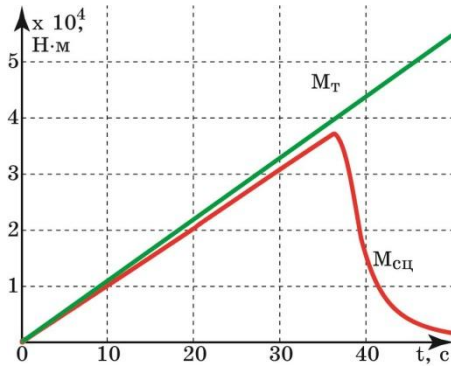


Рис. 3. Изменение момента тяги и момента сцепления. Иллюстрация процесса боксования

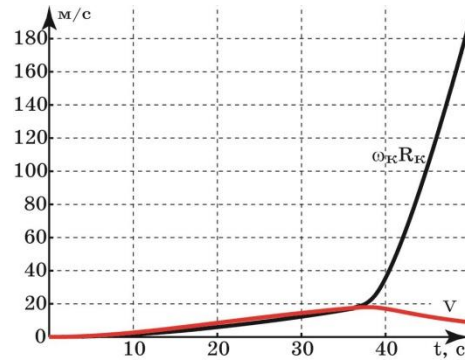


Рис. 4. Изменение скорости поступательного движения состава и приведенной скорости КП

**Процедура синтеза.** Синергетический синтез регулятора тяги, предотвращающего срыв сцепления в системе «тяговый привод – колесная пара – путь» осуществляется с использованием уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_k}{dt} &= \omega_k; & \frac{d\varphi_r}{dt} &= \omega_r; & \frac{dX_k}{dt} &= V_k; \\ J_k \frac{d\omega_k}{dt} &= -\frac{\hat{M}_{cц}}{K} - b_m(\omega_k K - \omega_r) - c_m(\varphi_k K - \varphi_r); & (5) \\ m_k \frac{dV_k}{dt} &= \frac{\hat{M}_{cц}}{R_k K} - b_x V_k - c_x X_k; \\ J_r \frac{d\omega_r}{dt} &= M_T - b_m(\omega_r - \omega_k K) - c_m(\varphi_r - \varphi_k K). \end{aligned}$$

В данной модели в отличие от (1), вместо момента сцепления подставлена его оценка. Наблюдатель момента сцепления строится в соответствии с методикой, описанной в [11] и в нашем случае имеет вид

$$\hat{M}_{cц} = -l_1 m_k R_k V_k K - z; \quad \frac{dz}{dt} = l_1 z + l_1^2 m_k R_k V_k K + l_1 R_k K (b_x V_k + c_x X_k). \quad (6)$$

Совокупность критериев управления в методе АКАР принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов – аттракторов, которые выступают как цель управления [10, 11]. При этом процедура синтеза сводится к поиску базовых законов управления, при которых указанные инварианты выполняются.

В соответствии с процедурой синергетического синтеза введем первую макропеременную

$$\psi_1 = \omega_r - \varphi_1, \quad (7)$$

удовлетворяющую решению функционального уравнения

$$\frac{d\psi_1}{dt} + \lambda_1 \psi_1 = 0, \quad (8)$$

где  $\lambda_1 > 0$  – параметр регулятора.

Из решения уравнения (8) с учетом модели синтеза (5) получим выражения для базового закона управления

$$M_T = J_r \left[ \frac{d\varphi_1}{dt} - \lambda_1 (\omega_r - \varphi_1) \right] + b_m (\omega_r - \omega_\kappa K) + c_m (\varphi_r - \varphi_\kappa K). \quad (9)$$

При попадании изображающей точки системы в окрестность многообразия  $\psi_1 = 0$  в замкнутой системе (5), (9) происходит динамическая декомпозиция. При этом поведение декомпозированной системы будет описываться следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_\kappa}{dt} &= \omega_\kappa; & \frac{d\varphi_r}{dt} &= \varphi_1; & \frac{dX_\kappa}{dt} &= V_\kappa; \\ J_\kappa \frac{d\omega_\kappa}{dt} &= -\frac{\hat{M}_{c\kappa}}{K} - b_m (\omega_\kappa K - \varphi_1) - c_m (\varphi_\kappa K - \varphi_r); \\ m_\kappa \frac{dV_\kappa}{dt} &= \frac{\hat{M}_{c\kappa}}{R_\kappa K} - b_x V_\kappa - c_x X_\kappa. \end{aligned} \quad (10)$$

На основе этой модели выполняется синтез «внутреннего» закона управления  $\varphi_1$  для рассматриваемого объекта. Для этого вводится вторая макропеременная [13]

$$\psi_2 = \omega_\kappa R_\kappa \left( 1 - \frac{\varepsilon}{100} \right) - V,$$

удовлетворяющая функциональному дифференциальному уравнению

$$\frac{d\psi_2}{dt} + \lambda_2 \psi_2 = 0, \text{ где } \lambda_2 > 0.$$

Выполнение инварианта  $\psi_2 = 0$  обеспечивает равенство скорости поступательного движения состава  $V$  и приведенной скорости КП  $\omega_\kappa R_\kappa$  с учетом требуемого скольжения  $\varepsilon$ .

Аналогично найдем выражение для «внутреннего» управления

$$\varphi_1 = \frac{1}{b_m} \left[ \frac{\hat{M}_{c\kappa}}{K} + b_m \omega_\kappa K + c_m (\varphi_\kappa K - \varphi_r) - \frac{\lambda_2 J_\kappa \psi_2}{R_\kappa \left( 1 - \frac{\varepsilon}{100} \right)} \right]. \quad (11)$$

Выражения (9) и (11) представляют закон управления системой (1), обеспечивающий стабилизацию скорости скольжения КП, что позволяет поддерживать максимально возможный момент тяги для текущих условий сцепления.

**Компьютерное моделирование.** На рис. 5 и 6 представлены результаты моделирования замкнутой системы (1), (2), (3), (4), (6), (9), (11). Использовались следующие значения параметров управляемой системы «тяговый привод – КП – путь»:  $R_\kappa = 0,625 \text{ м}$ ;  $J_\kappa = 400 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $m_\kappa = 3300 \text{ кг}$ ;  $c_m = 3500 \text{ кН/м}$ ;  $b_m = 10 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$ ;  $c_m = 50000 \text{ кН/м}$ ;  $b_m = 400 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$ ;  $\Pi = 250 \text{ кН}$ ;  $K = 3,65$ ;  $k_1 = 6$ ;  $k_2 = 0,018$ ;  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1000$ ;  $l_1 = -40$ ;  $\varepsilon = 1,95\%$ .

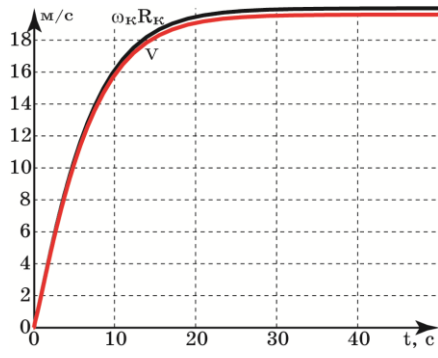


Рис. 5. Изменение скорости поступательного движения состава и приведенной скорости КП

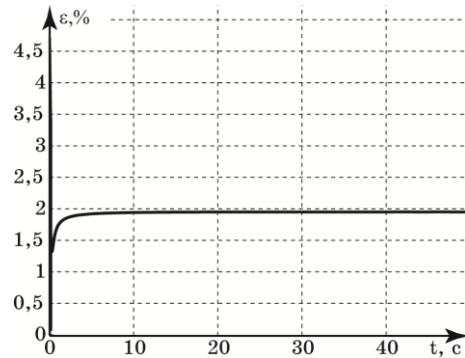


Рис. 6. Изменение относительной скорости скольжения КП

Приведенные результаты моделирования свидетельствуют о том, что относительная скорость скольжения поддерживается на заданном уровне, процесс боксования не наблюдается, локомотив выходит на скорость, максимальную для данных условий сцепления.

Для имитации дорожной ситуации с резким изменением условий сцепления, в выражении для переменной  $\psi_{сц}$  (4), зададим  $\psi_{сц0}$  кусочно-постоянной функцией:

$$\psi_{сц0} = \begin{cases} 0,28 & \text{при } 0 \leq t < 15; \\ 0,18 & \text{при } 15 \leq t < 35; \\ 0,24 & \text{при } t \geq 35. \end{cases}$$

На рис. 7–9 представлены результаты моделирования синтезированной системы при изменении момента сцепления наихудшим из возможных способов – мгновенное отклонение величины от текущего значения.

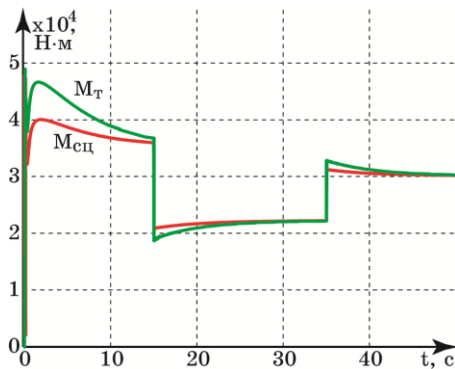


Рис. 7. Изменение момента тяги, прикладываемого к КП и момента сцепления

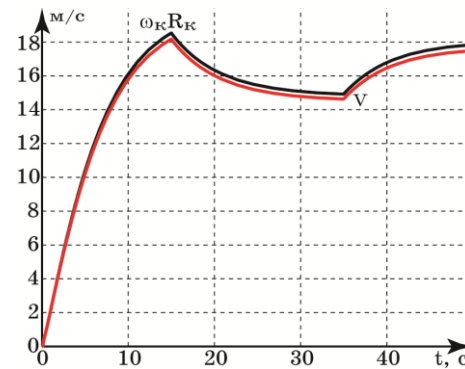


Рис. 8. Изменение скорости поступательного движения состава и приведенной скорости КП



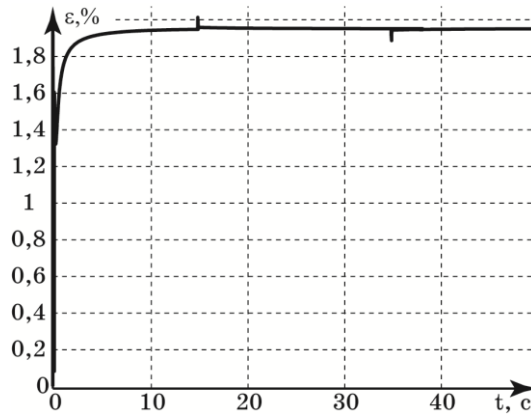


Рис. 9. Изменение относительной скорости скольжения КП

Необходимо отметить, что резкое падение момента сцепления (более чем на 35 %) не приводит к развитию процесса боксования КП, при этом скорость подвижного состава снижается до значения, соответствующего текущим дорожным условиям.

Кроме этого рассмотрим случай гармонического изменения момента сцепления:

$$M_{c\psi} = R_k \Pi \psi_{c\psi} k_{\psi} (1 + 0,1 \sin(62,8t)).$$

Частота колебаний величины  $M_{c\psi}$  составляет 10 Гц, амплитуда –  $0,1 M_{c\psi}$ .

Результаты моделирования замкнутой системы при данных условиях движения локомотива представлены на рис. 10, 11.

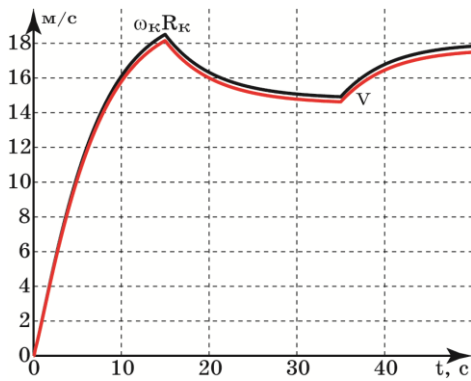


Рис. 10. Изменение скорости поступательного движения состава и приведенной скорости КП

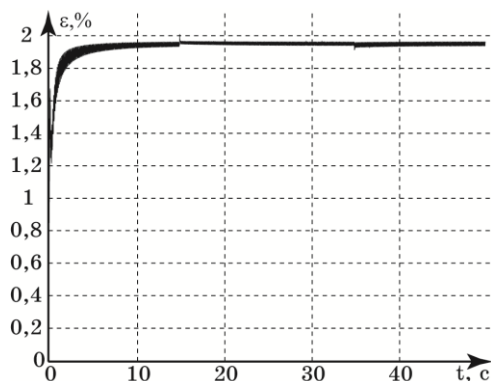


Рис. 11. Изменение относительной скорости скольжения КП

**Закключение.** Приведенные результаты моделирования свидетельствуют о выполнении поставленной технологической задачи. В данном случае поддержание значения скорости поступательного движения состава ниже максимально допустимой для текущих условий сцепления обеспечивается за счет снижения мощности тяговой установки.

Предложенные алгоритмы управления тягой электроривода подвижного состава позволяют реализовать режим максимальной тяги для конкретных условий сцепления. В реальной системе при различных дорожных условиях значения относительной скорости скольжения, при которой обеспечиваются наилучшее сцепление КП с поверхностью рельса, могут быть различными. Используя приведенный в статье наблюдатель момента сцепления можно предложить алгоритм адаптации к текущим дорожным условиям. Изменяя величину  $\mathcal{E}$  в регуляторе в диапазоне от 0 до 4% можно выделить значение этой переменной, при которой наблюдается максимальный момент сцепления  $\hat{M}_{сц}$ . Поддерживая относительную скорость скольжения КП, равной найденному значению, можно обеспечить реализацию режима максимальной тяги в текущих дорожных условиях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гарг В.К., Дуккипати Р.В.* Динамика подвижного состава: Пер. с англ. / Под ред. Н.А. Панькина. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с.
2. *Вербек Г.* Современные представления о сцеплении и его использовании // Железные дороги мира. – 1974. – № 4. – С. 28-53.
3. *Исаев И.П., Лужнов Ю.М.* Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами. – М.: Машиностроение, 1985. – 238 с.
4. *Коган А.Я.* Взаимодействие колеса и рельса при качении // Вестник ВНИИЖТ. – 2004. – № 5. – С. 33-40.
5. *Марков Д.П.* Взаимосвязь коэффициента трения с проскальзыванием в условиях взаимодействия колеса с рельсом // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 3. – С. 31-33.
6. *Шарпан Е.Н.* Применение метода акустической эмиссии для исследования процесса формирования сцепных характеристик контакта колесо–рельс // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – № 5. – С. 31-35.
7. *Самме В.Г.* Новые результаты в теории сцепления локомотива // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3 (28). – С. 14-16.
8. *Колтахчян П.Г.* Адаптационное управление асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов. – Ростов-на-Дону: Изд-во журн. «Изв. вузов Сев.-Кавк. регион», 2006. – 131 с.
9. *Ковалев Р.В., Матюшков С.Ю., Пугачев А.А., Роговцев Г.В., Федяева Г.А.* Совершенствование системы управления тяговым электроприводом грузового локомотива // Известия Тульского государственного ун-та. – 2010. – № 3. – Ч. 2. – С. 109-114.
10. *Колесникова А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
11. *Колесников А.А.* Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
12. Разработка комплекса предотвращения боксования: отчет о НИР (заключ.) / Рост. гос. ун-т. пут. сообщ. (РГУПС); рук. Коропец П.А. – Ростов-на-Дону, 2000. – 53 с. – № ГР 01.02.00 10888. – Инв. № 02.20.00 05443.
13. *Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А.* Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 123-137.

## REFERENCES

1. *Garg V.K., Dukkipati V.R.* Dynamics of Railway Vehicle Systems. Academic Press, 1984, 407 p. (Russ. ed.: *Garg V.K., Dukkipati R.V.* Dinamika podvizhnogo sostava. Moscow: Transport, 1988, 391 p.)
2. *Verbek G.* Sovremennye predstavleniya o stseplenii i ego ispol'zovanii [Modern ideas about the clutch and its use], *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world], 1974, No. 4, pp. 28-53.
3. *Isaev I.P., Luzhnov Yu.M.* Problemy stsepleniya koles lokomotiva s rel'sami [The problem of adhesion of the wheels of the locomotive and rails]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 238 p.

4. *Kogan A.Ya.* Vzaimodeystvie koleasa i rel'sa pri kachenii [The interaction of wheel and rail rolling], *Vestnik VNIIZhT* [Vniizht Bulletin], 2004, No. 5, pp. 33-40.
5. *Markov D.P.* Vzaimosvyaz' koeffitsienta treniya s proskal'zyvaniem v usloviyakh vzaimodeystviya koleasa s rel'som [The correlation coefficient of friction with slip-in terms of the interaction between wheel and rail], *Vestnik VNIIZhT* [Vniizht Bulletin], 2003, No. 3, pp. 31-33.
6. *Sharpan E.N.* Primenenie metoda akusticheskoy emissii dlya issledovaniya protsesssa formirovaniya stepnykh kharakteristik kontakta koleso–rel's [The use of acoustic emission method for the study of the process of forming the coupling characteristics of the contact wheel-rail], *Vestnik VNIIZhT* [Vniizht Bulletin], 2005, No. 5, pp. 31-35.
7. *Samme V.G.* Novye rezul'taty v teorii stsepleniya lokomotiva [New results in the theory of coupling of locomotive], *Transport Rossiyskoy Federatsii* [The Transport of the Russian Federation], 2010, No. 3 (28), pp. 14-16.
8. *Kolpakhch'yan P.G.* Adaptatsionnoe upravlenie asinkhronnym tyagovym privodom magistral'nykh elektrovozov [Adaptive management of asynchronous traction drive electric locomotives]. Rostov-on-Don: Izd-vo zhurn. «Izv. vuzov Sev.-Kavk. region», 2006, 131 p.
9. *Kovalev R.V., Matyushkov S.Yu., Pugachev A.A., Rogovtsev G.V., Fedyayeva G.A.* Sovershenstvovanie sistemy upravleniya tyagovym elektroprivodom gruzovogo lokomotiva [The improvement of the management system of the traction electric freight locomotive], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo un-ta* [Proceedings of Tula State University], 2010, No. 3, Part 2, pp. 109-114.
10. *Kolesnikova A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniyayu [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
11. *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 YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2006, No. 6 (61), pp. 10-38.
12. Razrabotka kompleksa predotvrashcheniya boksovaniya: otchet o NIR (zaklyuch.) [Development of complex prevent boksovaniya: research report], Rost. gos. un-t. put. soobshch. (RGUPS); ruk. Koropets P.A. Rostov-on-Don, 2000, 53 p. № GR 01.02.00 10888. Inv. № 02.20.00 05443.
13. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A.* Sinergeticheskoe upravlenie asinkhronnym tyagovym elektroprivodom lokomotivov [Synergistic control of asynchronous traction drive locomotives], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Journal of Computer and Systems Sciences International], 2014, No. 4, pp. 123-137.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Попов Андрей Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: andypriest@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634360707; кафедра СиПУ; доцент.

**Радионо́в Иван Алексе́евич** – e-mail: i.a.radionov@gmail.ru; кафедра СиПУ; ассистент.

**Popov Andrey Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: andypriest@mail.ru; 2, Chehov street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634360707; the department of SCP; associate professor.

**Radionov Ivan Alekseevich** – e-mail: i.a.radionov@gmail.ru; the department of SCP; assistant.