Пути повышения эффективности систем автоматического регулирования нажатия токоприемников для высоких скоростей движения

А. С. ГОЛУБКОВ, О. А. СИДОРОВ, С. Н. СМЕРДИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС), Омск, 644046, Россия

Аннотация. Одним из лимитирующих факторов при повышении скоростей движения поездов на железнодорожном транспорте является качество токосъема. С ростом скоростей движения увеличиваются динамические нагрузки на токоприемник со стороны подвижного состава и повышается аэродинамическое воздействие, что приводит к увеличению разброса величины контактного нажатия, появлению отрывов полоза токоприемника от контактного провода, дугообразованию в контакте и повышенному износу контактных элементов.

Перспективным направлением в решении этого вопроса является применение систем автоматического регулирования, позволяющих стабилизировать величину контактного нажатия. В статье рассмотрены особенности современных систем автоматического регулирования нажатия токоприемников, указаны их основные недостатки. Предложена новая схема автоматического регулирования нажатия токоприемника, отличающаяся повышенным быстродействием. Описана математическая модель токоприемника и приведены результаты расчета параметров быстродействующей системы регулирования, показывающие возможность ее применения с целью снижения разброса величины контактного нажатия токоприемника и повышения качества токосъема при высоких скоростях движения.

Ключевые слова: высокоскоростное движение; токоприемник; математическая модель; контактное нажатие; система автоматического регулирования

Введение. Обеспечение качества и надежности токосъема является одной из важнейших задач при возрастающих скоростях движения. Повышение скорости подвижного состава приводит к увеличению частот и амплитуд колебаний токоприемника и, соответственно, к возрастанию динамических нагрузок на него. При скоростях движения свыше 200 км/ч аэродинамическое воздействие оказывает значительное влияние на контактное нажатие токоприемника, мгновенные значения аэродинамической подъемной силы могут превышать величину статического нажатия токоприемника [1]. При скоростях движения подвижного состава, сравнимых со скоростью распространения волны в контактной подвеске, на процесс взаимодействия токоприемника с контактным проводом значительно влияют колебательные процессы в проводах контактной сети [2].

Для оценки качества контактного нажатия токоприемника на контактный провод принято использовать силу его нажатия $F_{\text{кн}}$. При уменьшении силы нажатия возрастает вероятность потери контакта, искрения и дугообразования, что приводит к перегреву контактных элементов и их повышенному износу. При увеличении силы нажатия повышается механический износ контактных материалов и возрастает вероятность повреждений узлов контактной сети. Для оценки разброса величины контактного нажатия при токосъеме широко применяется среднеквадратичное отклонение контактного нажатия $\sigma F_{\text{кн}}$, при уменьшении $\sigma F_{\text{кн}}$ повышается качество и надежность токосъема [3].

Одним из перспективных способов повышения качества токосъема является применение систем автоматического регулирования нажатия токоприемника. Данные системы предназначены для контроля текущего значения контактного нажатия и его корректировки путем воздействия на токоприемник, что приводит к снижению разброса величины нажатия. Существующие конструкции систем автоматического регулирования нажатия токоприемников предусматривают управление характеристиками токоприемника путем изменения давления в пневматическом резинокордном подъемном механизме [4]. Большой объем резинокордной оболочки в сочетании с ограниченным сечением подводящих трубок обуславливает значительную инерцию регулятора, что, в свою очередь, приводит к снижению эффективности регулирования при частотах внешнего воздействия свыше 1 Гц [5].

Исследования характеристик процесса токосъема показали, что частотный состав контактного нажатия зависит от таких параметров, как скорость движения подвижного состава, длина пролета контактной сети, расстояние между струнами [6, 7]. При этом основная частота колебаний контактного нажатия лежит в диапазоне от 0,7 до 1,5 Гц при скоростях движения до 300 км/ч [8, 9]. Это означает, что существующие регу-

ляторы нажатия теряют свою эффективность при скоростях движения подвижного состава свыше 250 км/ч.

Быстродействующая система регулирования нажатия. Повысить эффективность регулятора можно за счет применения быстродействующих актуаторов, расположенных вблизи точки контакта и обладающих низкой инерционностью. Авторами предложено использовать в качестве таких актуаторов пневматические цилиндры двустороннего действия, расположенные параллельно с упругими элементами в конструкции кареток токоприемника.

Для того чтобы обеспечить быстродействующее изменение давления в пневматических цилиндрах кареток, они соединяются с управляющим пневматическим цилиндром большего объема при помощи трубок. Шток управляющего пневматического цилиндра через реечную передачу связан с электроприводом, приводимым в действие по сигналу регулирующего устройства. В качестве обратной связи для работы регулирующего устройства используется сигнал от датчиков контактного нажатия, размещенных в полозе токоприемника. Схема быстродействующей системы автоматического регулирования нажатия токоприемника приведена на рис. 1.

Математическая модель быстродействующей системы регулирования нажатия токоприемника. С целью оценки быстродействия и эффективности регулирования, а также для определения оптимальных конструктивных параметров системы разработана математическая модель токоприемника с быстродействующей системой автоматического регулирования (рис. 2) [10]. Базовой является трехмассовая модель токоприемника, в состав которой добавлен пневматический цилиндр, расположенный параллельно упругому элементу в каретке. В систему дифференциальных уравнений движения масс токоприемника добавлены силы действия штока пневматического цилиндра на полз и верхнюю раму:

$$m_n \ddot{y}_n = -k_k (y_n - y_{p2}) - S(\dot{y}_n - \dot{y}_{p2}) F_{тр,р} - P_3 S_3 + P_4 S_4 + P_A (S_3 - S_4) - F_{кн}; \quad (1)$$

$$m_{p2} \ddot{y}_{p2} = -k_k (y_p - y_n) - S(\dot{y}_{p2} - \dot{y}_n) F_{тр,р} - k_{p2} (y_{p2} - y_{p1}) + P_3 S_3 - P_4 S_4 - P_A (S_3 - S_4); \quad (2)$$

$$m_{p1} \ddot{y}_{p1} = F_{ст} - k_{p2} (y_{p1} - y_{p2}) - S(\dot{y}_{p1} - \dot{y}_{p2}) F_{тр,р} - r_p (\dot{y}_{p1} - \dot{y}_{p2}), \quad (3)$$

где m_n — масса полза токоприемника; m_{p1}, m_{p2} — приведенные массы верхней и нижней рам токоприемника соответственно; $F_{кн}$ — контактное нажатие токоприемника на контактный провод; $y_n, \dot{y}_n, \ddot{y}_n$ — координата, скорость и ускорение центра массы полза токоприемника соответственно; $y_{p1}, \dot{y}_{p1}, \ddot{y}_{p1}$ — координата, скорость и ускорение центра приведенной

Рис. 1. Схема быстродействующей системы автоматического регулирования нажатия токоприемника: 1 — система подвижных рам; 2 — резинокордный подъемный элемент; 3 — каретка; 4 — датчик контактного нажатия; 5 — управляющий пневматический цилиндр; 6 — пневматический цилиндр каретки; 7 — электропривод; 8 — источник сжатого воздуха; 9 — регулирующее устройство

Fig. 1. Scheme of rapid automatic control system of pressing current collector:

1 — system of moving frames; 2 — rubber-cord lifting element; 3 — carriage; 4 — contact pressure sensor; 5 — control pneumatic cylinder; 6 — carriage pneumatic cylinder; 7 — electric drive; 8 — compressed air source; 9 — regulating device

массы нижней рамы токоприемника соответственно; $y_{p2}, \dot{y}_{p2}, \ddot{y}_{p2}$ — координата, скорость и ускорение центра приведенной массы верхней рамы токоприемника соответственно; $F_{тр,р}$ — сила сухого трения в системе подвижных рам; k_k — коэффициент жесткости каретки; r_p — коэффициент вязкого трения в системе подвижных рам; k_{p2} — коэффициент жесткости верхней рамы; $F_{ст}$ — статическое нажатие токоприемника; S_3, S_4 — площадь поршневой и штоковой частей цилиндра каретки соответственно; P_3, P_4 — давление в поршневой и штоковой частях цилиндра каретки соответственно; P_A — атмосферное давление; S — сигмоида, выраженная функцией гиперболического тангенса.

Модель управляющего пневматического цилиндра с электромеханическим приводом показана на рис. 3. Электропривод управляется при помощи регулирующего устройства, на вход которого поступает сигнал контактного нажатия [11]. В регулирующем устройстве используется пропорционально-интегральный (ПИ) алгоритм для формирования сигнала воздействия на электропривод. В качестве электропривода выбран электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

Уравнение вращательного момента электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением может быть записано в следующем виде:

Рис. 2. Схема трехмассовой математической модели токоприемника с быстродействующим пневматическим цилиндром в конструкции каретки:

m_n — масса полоза токоприемника; m_{p1} , m_{p2} — приведенные массы нижней и верхней рам токоприемника соответственно; $F_{кн}$ — контактное нажатие токоприемника на контактный провод; y_n — координата массы полоза токоприемника; y_{p1} — координата центра приведенной массы нижней рамы токоприемника; y_{p2} — координата центра приведенной массы верхней рамы токоприемника; $F_{тр.р}$ — сила сухого трения в системе подвижных рам; k_k — коэффициент жесткости каретки; r_p — коэффициент вязкого трения в системе подвижных рам; k_{p2} — коэффициент жесткости верхней рамы; $F_{ст}$ — статическое нажатие токоприемника

Fig. 2. Scheme of a three-mass mathematical model of a current collector with rapid pneumatic cylinder in the carriage design:

m_n — mass of the current collector skid; m_{p1} , m_{p2} — reduced masses of the lower and upper frames of the current collector respectively; $F_{кн}$ — contact pressing of the current collector on the contact wire; y_n — mass coordinate of the current collector skid; y_{p1} — coordinate of the center of reduced mass of bottom frame of the current collector; y_{p2} — coordinate of the center of reduced mass of upper frame of current collector; $F_{тр.р}$ — force of dry friction in the system of moving frames; k_k — coefficient of rigidity of the carriage; r_p — coefficient of viscous friction in the system of moving frames; k_{p2} — stiffness coefficient of the upper frame; $F_{ст}$ — static pressing of the current collector

Рис. 3. Модель управляющего пневматического цилиндра с электромеханическим приводом:

F_1 — сила на штоке пневмоцилиндра; x_1 — координата поршня

Fig. 3. Model of pneumatic cylinder

with electromechanical drive:

F_1 — force on the pneumatic cylinder rod; x_1 — piston coordinate

$$M - M_c = J_\varepsilon \frac{d^2 \alpha}{dt^2}, \quad (4)$$

где M_c — момент сопротивления движению, определяемый силой на штоке пневмоцилиндра F_1 и диаметром шестерни D ; M — момент, развиваемый двигателем; α — угол поворота оси двигателя; J_ε — момент инерции подвижных частей двигателя.

Учитывая, что перемещение штока цилиндра связано с углом поворота вала $x_1 = 2\pi D\alpha$, выражение (4) примет вид

$$M - DF_1 = \frac{J_\varepsilon}{\pi D} \frac{d^2 x_1}{dt^2}. \quad (5)$$

Функция ПИ-регулятора для управления двигателем может быть записана следующим образом:

$$M = k_p F_{oy} + k_i \int_0^t F_{oy} dt, \quad (6)$$

где k_p и k_i — коэффициенты ПИ-регулятора; F_{oy} — ошибка управления, величина которой определяется разностью между статическим нажатием токоприемника и мгновенным значением контактного нажатия.

Дифференциальное уравнение сил в управляющем пневматическом цилиндре имеет вид

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P_1 S_1 - P_2 S_2 - P_A (S_1 - S_2) - F_1 - S(\dot{x}_1) F_{тр}, \quad (7)$$

где P_1 — давление в поршневой части; P_2 — давление в штоковой части; m_1 — масса поршня; x_1 — координата поршня; $\dot{x}_1$ — скорость движения поршня; S_1 — сечение поршня; S_2 — сечение штоковой части цилиндра; $F_{тр}$ — сила трения покоя в пневматическом цилиндре.

Уравнения состояния управляющего пневматического цилиндра описывают изменение давления в поршневой и штоковой полостях

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{k f_1 \sqrt{RT_M}}{S_1 (x_1 + x_{10}) \sqrt{\zeta}} \sqrt{P_3^2 - P_1^2} - \frac{k P_1}{(x_1 + x_{10})} \frac{dx_1}{dt}; \quad (8)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{k f_2 \sqrt{RT_M}}{S_2 (x_1 + x_{12}) \sqrt{\zeta}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{P_2^2 - P_A^2} + \frac{k P_2}{(x_1 + x_{10})} \frac{dx_1}{dt}, \quad (9)$$

где ζ — коэффициент сопротивления линии, дросселей; k — показатель адиабаты; f_1 , f_2 — сечения впускных отверстий управляющего цилиндра; R — газовая постоянная; T_M — температура газа в магистрали; x_{10} — начальное положение поршня; x_{12} — конечное положение поршня.

Рис. 4. Структура математической модели системы регулирования нажатия токоприемника в среде MATLAB/Simulink:
1 — модель контакта токоприемника с контактным проводом; 2 — модель каретки токоприемника с пневматическим цилиндром;
3 — модель регулятора нажатия

Fig. 4. Structure of the mathematical model of the control system of pressing current collector in MATLAB/Simulink:
1 — model of contact of current collector with contact wire; 2 — model of current collector carriage with pneumatic cylinder;
3 — model of the pressure regulator

Для пневматического цилиндра каретки также записываются два уравнения состояния для двух полостей:

$$\frac{dP_3}{dt} = \frac{kf_1\sqrt{RT_M}}{S_3(y_k - y_{p2} + y_{20})\sqrt{\zeta}}\sqrt{P_1^2 - P_3^2} - \frac{kP_3}{(y_k - y_{p2} + y_{20})}\frac{dx}{dt}, \quad (10)$$

$$\frac{dP_4}{dt} = \frac{kf_4\sqrt{RT_M}}{S_4(y_k - y_{p1} + y_{21})\sqrt{\zeta}}\left(\frac{P_4}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\sqrt{P_4^2 - P_A^2} + \frac{kP_4}{(y_k - y_{p1} + y_{21})}\frac{d(y_k - y_{p1})}{dt}, \quad (11)$$

где y_{20} и y_{21} — начальное и конечное положение поршня соответственно; f_3, f_4 — сечения впускных отверстий цилиндра каретки.

Рис. 5. Семейство переходных функций быстродействующего регулятора нажатия токоприемника:
1 — сила статического нажатия токоприемника; 2 — контактное нажатие токоприемника на контактный провод
Fig. 5. Family of transitional functions of rapid pressing controller of current collector:
1 — force of static pressing of the current collector; 2 — contact pressing of the current collector on the contact wire

Для расчета контактного нажатия модель была реализована в среде MATLAB/Simulink при помощи блоков из библиотеки Simscape. Структура математической модели системы регулирования нажатия токоприемника представлена на рис. 4.

Со стороны контактной сети на токоприемник оказывается гармоническое воздействие для имитации движения подвижного состава, его частота

определяется моделируемой скоростью движения и длиной пролета контактной сети, для которой выполняется расчет [12].

С целью определения оптимальных параметров ПИ-регулятора был выполнен расчет переходных функций для диапазона коэффициентов k_p и k_i (у каждого коэффициента свой диапазон — см. рис. 5). Семейство переходных функций регулятора при изменении статического нажатия токоприемника от 100 до 120 Н показано на рис. 5. Из-за особенности конструкции регулятора он не способен поддерживать постоянное повышенное нажатие, поскольку в результате увеличения силы нажатия в пневматических цилиндрах каретки система подвижных рам токоприемника начинает движение вниз, что приводит к уменьшению нажатия на контактный провод. Поэтому регулятор может действовать только на коротких промежутках времени, после чего требуется возврат регулирующего пневматического цилиндра в исходное положение. Оптимальными значениями коэффициентов регулятора выбраны $k_p = 1,5$ и $k_i = 1,0$, так как они обеспечивают достаточно ста-

Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика быстродействующего регулятора нажатия токоприемника
Fig. 6. Amplitude-frequency characteristic of rapid regulator of pressing of current collector

Рис. 7. Результаты расчета контактного нажатия с использованием системы автоматического регулирования для разных скоростей движения: 1 — нажатие с выключенным регулятором; 2 — нажатие с включенным регулятором

Fig. 7. Results of the calculation of contact pressing using the automatic control system for different speeds of motion: 1 — pressing with the regulator turned off; 2 — press with the regulator on

бильное поддержание контактного нажатия в течение 1–2 с при удовлетворительном значении постоянной времени. Постоянная времени регулятора составляет 0,27 с, что значительно меньше типичных величин постоянной времени для существующих регуляторов контактного нажатия, значения которых лежат в диапазоне 0,8–1,2 с. Амплитудно-частотная характеристика регулятора представлена на рис. 6.

Для оценки эффективности работы регулятора был выполнен расчет контактного нажатия при движении по контактной подвеске с длиной пролета 65 м, стрелой провеса 5 см и коэффициентом неравномерности эластичности 1,2. Расчет выполнялся для двух случаев: с действующей и отключенной системой регулирования нажатия для диапазона скоростей от 80 до 260 км/ч с шагом 20 км/ч. Временные

Рис. 8. Изменение среднеквадратичного отклонения контактного нажатия от скорости движения подвижного состава для модели с включенным регулятором (черные столбцы) и с выключенным регулятором (серые столбцы)
Fig. 8. Change in the standard deviation of the contact pressure from the speed of motion of the rolling stock for a model with the regulator on (black columns) and with the regulator off (gray columns)

ряды и гистограммы распределения контактного нажатия по результатам расчета приведены на рис. 7.

Сравнение величин среднеквадратичного отклонения контактного нажатия σF_{kn} от скорости для моделей с работающим и отключенным быстродействующим регулятором показано на рис. 8. Из графика видно, что при скорости движения 260 км/ч включение быстродействующего регулятора позволяет снизить σF_{kn} на 37% — с 21,9 до 13,8 Н.

Заключение. Анализ характеристик передаточных функций регулятора показывает, что применение алгоритма ПИ-регулятора является эффективным для стабилизации контактного нажатия. Поскольку длина хода штока пневмоцилиндра ограничена, регулятор способен поддерживать нажатие ограниченное время, после чего требуется возврат штока в исходное положение. Скорость движения штока лимитирована характеристиками исполнительного механизма (электродвигателя). Эти особенности вызывают значительный разброс параметров системы, таких как постоянная времени и длительность поддержания стабильного нажатия, в зависимости от значений коэффициентов регулятора k_p и k_i , которые следует задавать с учетом параметров токоприемника, условий эксплуатации и типа контактной подвески. Для рассмотренной модели токоприемника оптимальными значениями коэффициентов регулятора являются $k_p = 1,5$ и $k_i = 1,0$.

Результаты расчетов показали, что применение быстродействующего регулятора на основе пневматического цилиндра в конструкции каретки позволяет снизить среднеквадратичное отклонение контактного нажатия до 37% при скоростях движения до 260 км/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ецков Т.А., Попов П.В. Исследование аэродинамических характеристик скоростного токоприемника // Вестник ВЭЛНИИ. 2014. № 1. С. 28–37.

2. Вологин В.А., Герасимов А.С. Динамические параметры системы контактная сеть—токоприемник // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 2. С. 19–23.

3. Тюрнин П.Г., Тибилов А.Т., Миронос Н.В. Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования: сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ». М.: ВМГ-Принт, 2015. 166 с. (Труды ОАО «ВНИИЖТ»).

4. Chater E., Ghani D., Giri F., Haloua M. Output feedback control of pantograph—catenary system with adaptive estimation of catenary parameters // Journal of Modern Transportation. 2015. Vol. 23, no. 4. P. 252–261. DOI: 10.1007/s40534-015-0085-z. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-015-0085-z> (дата обращения: 10.01.2019 г.).

5. Yamashita Y., Ikeda M., Masuda A. Advanced active control of a contact force between a pantograph and a catenary for a high speed train // Proceedings of 9th world congress of railway research. Lille, 2011. P. 28–33. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/53/1/53_1_28/_article (дата обращения: 10.01.2019 г.).

6. Ецков Т.А., Попов П.В. Системы управления токоприемниками // Вестник ВЭЛНИИ. 2015. № 2. С. 12–21.

7. Сидоров О.А., Смердин А.Н., Жданов В.А. Методика оценки функциональной готовности системы токосъема скоростных участков магистральных железных дорог // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 1. С. 27–32.

8. Мешеряков В.А., Смердин А.Н., Голубков А.С. Предпосылки получения статистически достоверных данных в ходе имитационного моделирования токосъема // Вестник ВЭЛНИИ. 2013. № 2. С. 104–121.

9. Makino T., Yoshida K., Seto S., Makino K. Running test on current collector with contact force controller for high-speed railways // JSME International Journal. Series C. 1997. Vol. 40, no. 4. P. 671–680.

10. Pisano A., Usai E. Output-feedback regulation of the contact force in high-speed train pantographs // Transactions of the ASME. 2004. Vol. 126. P. 82–87. DOI: 10.1115/1.1649973.

11. Allotta B., Pisano A., Pugi L., Usai E. VSC of a servo-actuated ATR 90-type pantograph // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision, and Control and the European Control Conference (Siviglia, Desember 12–15, 2005). Siviglia, 2005. P. 590–595.

12. Sidorov O.A., Goryunov V.N., Golubkov A.S. Improvement of automatic control system for high-speed current collectors // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012108> (дата обращения: 10.01.2019 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛУБКОВ Антон Сергеевич,
канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС

СИДОРОВ Олег Алексеевич,
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС

СМЕРДИН Сергей Николаевич,
аспирант, кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС

Статья поступила в редакцию 15.01.2019 г., принята к публикации 24.03.2019 г.

Ways to improve the efficiency of automatic control systems of pressing current collectors for railway service of high speeds

A. S. GOLUBKOV, O. A. SIDOROV, S. N. SMERDIN

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State University of Railway Transport" (FGBOU VO OmGUPS), Omsk, 644046, Russia

Abstract. One of the limiting factors in increasing train speeds on railway transport is the quality of current collection. With increasing operation speeds, the dynamic loads on the current collector from the rolling stock increase and the aerodynamic impact increases as well, which leads to an increase in the variation of the contact pressure, tearing off the current collector from the contact wire, arcing in contact and increased wear of the contact elements. A promising direction in addressing this issue is the use of automatic control systems, allowing to stabilize the amount of contact pressure. The article discusses the features of modern automatic control systems for pressing current collectors, its main disadvantages are indicated. Authors proposed new automatic control circuit for pressing a current collector, characterized by increased speed. A mathematical model of a current collector equipped with a high-speed automatic pressure control system is described. The results of the calculation of the parameters of the high-speed control system are presented, showing the possibility of its use in order to reduce the spread of the contact pressure of the current collector and improve the quality of the current collection at high speeds. Analysis of the characteristics of the transfer functions of the regulator shows that the application of the PI controller algorithm is effective for stabilizing the contact pressure. Since the rod length of the pneumatic cylinder is limited, the regulator is able to maintain pressure for a limited time, after which the rod must be returned to its original position. The speed of the rod is limited by the characteristics of the actuator (electric motor). These features cause a significant variation in system parameters, such as the time constant and the duration of maintaining a stable depression, depending on the values of the controller coefficients k_p and k_i , which should be set taking into account the parameters of the current collector, operating conditions and type of contact suspension. For the considered current collector model, the optimal values of the controller coefficients are $k_p = 1.5$ and $k_i = 1.0$. Results of the calculations showed that the use of a rapid regulator based on a pneumatic cylinder in the carriage design reduces the standard deviation of the contact pressure to 37 % at speeds of up to 260 km/h.

Keywords: high-speed operation; current collector; mathematical model; contact pressing; automatic control system

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-74-81>

REFERENCES

1. Etskov T. A., Popov P. V. *Issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik skorostnogo tokopriemnika* [Research of aerodynamic characteristics of rapid current collector]. Vestnik VELNII [Bulletin of VELNII], 2014, no. 1, pp. 28–37.
2. Vologin V. A., Gerasimov A. S. *Dinamicheskie parametry sistemy kontaktnaya set' — tokopriemnik* [Dynamic parameters of the system contact network — current collector]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, no. 2, pp. 19–23.
3. Tyurnin P. G., Tibilov A. T., Mironos N. V. *Tokos "em: nadezhnost', ekonomichnost' i puti sovershenstvovaniya. Sb. tr. uchenykh OAO "VNIIZhT"* [Current collection: reliability, efficiency and ways to improve. Proc. of works of scientists of the JSC "VNIIZhT"]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015, 166 p.

4. Chater E., Ghani D., Giri F., Haloua M. *Output feedback control of pantograph – catenary system with adaptive estimation of catenary parameters*. Journal of Modern Transportation. 2015. Vol. 23, no. 4. pp. 252–261. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-015-0085-z> (retrieved on 10.01.2019).

5. Yamashita Y., Ikeda M., Masuda A. *Advanced active control of a contact force between a pantograph and a catenary for a high speed train*. Proceedings of 9th world congress of railway research. Lille, 2011, pp. 28–33. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtrir/53/1/53_1_28/article (retrieved on 10.01.2019).

6. Etskov T. A., Popov P. V. *Sistemy upravleniya tokopriemnikami* [Control systems for current collectors]. Vestnik VELNII [Bulletin of the VELNII], 2015, no. 2, pp. 12–21.

7. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. *Metodika otsenki funktsional'noy gotovnosti sistemy tokos "ema skorostnykh uchastkov magistral'nykh zheleznnykh dorog* [Methods for assessing the functional readiness of the current collection system of high-speed sections of main railways]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2012, no. 1, pp. 27–32.

8. Meshcheryakov V. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S. *Predposylki polucheniya statisticheski dostovernykh dannykh v khode imitatsionnogo modelirovaniya tokos "ema* [Prerequisites for obtaining statistically reliable data during the simulation of current collection]. Vestnik VELNII, 2013, no. 2, pp. 104–121.

9. Makino T., Yoshida K., Seto S., Makino K. *Running test on current collector with contact force controller for high-speed railways*. JSME International Journal, Series C, 1997, Vol. 40, no. 4, pp. 671–680.

10. Pisano A., Usai E. *Output-feedback regulation of the contact-force in high-speed train pantographs*. Transactions of the ASME, 2004, Vol. 126, pp. 82–87.

11. Allotta B., Pisano A., Pugi L., Usai E. *VSC of a servo-actuated ATR 90-type pantograph*. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision, and Control and the European Control Conference (Siviglia, Desember 12–15, 2005), Siviglia, 2005, pp. 590–595.

12. Sidorov O. A., Goryunov V. N., Golubkov A. S. *Improvement of automatic control system for high-speed current collectors*. Journal of Physics: Conference Series, 2018, Vol. 944. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012108> (retrieved on 10.01.2019).

ABOUT THE AUTHORS

Anton S. GOLUBKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Electric power supply of railways", FGBOU VO OmGUPS

Oleg A. SIDOROV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department "Electric power supply of railways", FGBOU VO OmGUPS

Sergey N. SMERDIN,

Post-graduate, Department "Electric power supply of railways", FGBOU VO OmGUPS

Received 15.01.2019

Accepted 24.03.2019

■ E-mail: anton.golubkov@omgups.com (A. S. Golubkov)