УДК 629.4.015

Горбунов Н.И., д.т.н.

(профессор, заведующий кафедрой железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)

Клюев С.А., к.т.н.

(доцент кафедры логистического управления и безопасности движения на транспорте, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)

Михайлов Е.В., к.т.н.

(доцент кафедры логистического управления и безопасности движения на транспорте, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)

Семенов С.А., к.т.н.

(доцент кафедры логистического управления и безопасности движения на транспорте, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)

Ковтанец М.В., к.т.н.

(доцент кафедры железнодорожного, автомобильного транспорта и подъемно-транспортных машин, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля)

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ КОЛЕСНЫХ ПАР

Сформулированы требования к характеристикам аппаратного и программного обеспечения, обеспечивающего техническую реализацию мехатронных систем управления положением колесных пар рельсовых экипажей в горизонтальной плоскости для их радиальной установки в криволинейных участках пути с целью обеспечения оптимального взаимодействия колес и рельсов, характеризующегося минимальными боковыми силами и снижением износа. Предложенная мехатронная система позиционирования колесных пар позволяет оптимально устанавливать их на рельсовом пути при различных условиях движения экипажа. Результаты расчетов, выполненных на примере движения в кривой трехосной тележки тепловоза 2ТЭ116, показали возможность значительного уменьшения направляющих сил и минимизации углов набегания колесных пар.

Ключевые слова: рельсовый экипаж, колесная пара, радиальная установка, управление, актуатор, мехатронная система.

Введение. Заложенные в конструкцию возможности обеспечения оптимального взаимодействия колес с рельсами определяют уровень безопасности движения и энергетической эффективности рельсовых транспортных средств (далее РТС). Традиционные схемы ходовых частей не имеют резерва развития в этом плане. Один из путей обеспечения оптимального взаимодействия между

DOI:10.32703/2617-9040-2020-35-8

колесами рельсовых экипажей и рельсами с минимальными поперечными усилиями и низким уровнем износа состоит в применении систем управления положением колесных пар в горизонтальной плоскости для радиальной их установки в кривых участках пути [1, 2, 3].

Анализ последних исследований и постановка проблемы. У тележек рельсовых транспортных средств с радиальной установкой осей колесных пар углы набегания колес на рельсы при движении в кривых близки к нулю. За счет этого в первую очередь и обеспечивается минимизация силового взаимодействия колес с рельсами и сопротивления движению [1-5]. Известные конструкции таких тележек условно можно разделить на [6-8]: тележки с самоустановкой колесных пар; тележки с полупринудительной установкой колесных пар; тележки с принудительной установкой колесных пар.

Тележки с самоустановкой колесных пар в кривых показали малую эффективность из-за увеличения износа рельсов и повышенного сопротивления движению при движении на прямых участках пути. Несколько лучшие показатели по снижению интенсивности износа гребней колес в кривых у тележек с полупринудительной ориентацией осей колесных пар (пассивный механизм радиальной установки). Однако опыт использования пассивных механизмов радиальной установки колесных пар для снижения износа гребней колес в кривых на железных дорогах Европы оказался не очень успешным [9].

Цель и задачи исследования. Достижение максимального эффекта по снижению интенсивности износа гребней колес и сопротивления движению РТС в кривых возможно при использовании тележек с автоматически управляемыми механизмами радиальной установки колесных пар, основанными на применении мехатронных систем. Пока в известных публикациях достаточно мало информации о разработке и испытаниях таких систем. Причина, видимо, в сложности этих систем и необходимости получения для их эффективной работы значительного объема информации о режимах движения, геометрических параметрах пути и углах набегания колес на рельсы в реальном режиме времени. Однако, потенциальные преимущества, которые можно получить при внедрении в конструкции РТС подобных мехатронных систем, делают перспективными дальнейшие работы по их разработке и исследованию.

Материалы и методы исследования. Входящие в мехатронную автоматическую систему управления положением колесной пары (МАСУКП) в рельсовой колее устройства, должны представлять единую замкнутую систему, в которой неразрывно связаны между собой параметры различных электрических, механических и гидравлических процессов. В связи с высокими требованиями по надежности и временным ограничениям по формированию и передаче управляющего сигнала на исполнительное устройство, работа МАСУКП для РТС должна осуществляться в режиме реального времени [10].

Основным требованием к системам реального времени является их предсказуемость, что предполагает соблюдение всех требований тайминга (временных требований) при самых наихудших ситуациях.

Управление данными в МАСУКП РТС должно обеспечивать:

- предсказуемость в отношении тайминга;
- наличие возможности доступа и управления данными в любой момент времени;
- минимум расходов;
- эффективный механизм управления данными, с соблюдением требований объемов памяти и загруженности процессора.

Программная платформа таких систем должна представлять собой операционную систему реального времени (ОС РВ), которая может удовлетворить следующие требования:

реагировать на текущие события, успевая обработать их за фиксированное время или к определенному моменту времени (далее – временные рамки).

обладать способностью к параллельной обработке нескольких событий. Если эти события наступают одновременно, система должна успеть обработать их все в соответствующих каждому из них временных рамках, независимо от количества, порядка поступления и соотношения их временных рамок. Вероятность сбоя в программном обеспечении (ПО) таких систем должна быть очень маленькой.

Аппаратные и программные средства, обеспечивающие техническую реализацию МАСУКП, должны отвечать современным требованиям унификации и стандартизации, метрологической, конструктивной, информационной и эксплуатационной совместимости, принципам модульного построения. При выполнении этих требований обеспечивается надежность построенной на основе этих средств мехатронной системы, достоверность и оперативность получаемой информации, гарантированное исполнение командной информации.

Обработка МАСУКП может осуществляться следующим образом. В полунатурном управлении применяются промышленные контроллеры (микроконтроллеры), позволяющие управлять моделью управляемого модуля в реальном времени. Модель движения РТС с МАСУКП может быть выполнена для работы в режиме реального времени с использованием пакетов Matlab/Simulink и Real-Time Workshop Real-Time Target. Имитация модели движения РТС обеспечивает вычисление параметров всех процессов в реальном времени, преобразование их цифро-аналоговым преобразователем и подачу на управляющую систему в виде напряжения [11]. Управляющие сигналы, генерируемые управляющим устройством, через аналого-цифровые преобразователи подаются на имитируемую модель. В полунатурном управлении аппаратное средство управляет имитируемой моделью, что близко к управлению объектом в реальной системе.

Алгоритм работы управляющего устройства реализуется на ПК и загружается в микроконтроллер посредством программного обеспечения. Микроконтроллер, работая в режиме реального времени, обеспечивает сбор данных, их обработку в соответствии с заданными алгоритмами и выдачу управляющего воздействия за определенный интервал времени. Управляющий модуль соединяется с физической системой и использует информацию с датчиков для управления поворотом колесных пар РТС в рельсовой колее.

Процесс преобразования алгоритма управления в код управления осуществляется с помощью:

1. Real-time Workshop, Visual C с использованием Toolbox Real Time Target для ПК.
2. Tasking CrossView compiler version 8.0 r2, и Minimon с использованием Toolbox Embedded Target for Infineon C166 Microcontrollers для микроконтроллера.

В качестве модели управляемой колесной пары, используется компьютерная модель, работающая в режиме реального времени в программной среде Matlab/Simulink и связанная с платой ввода/вывода AD512 с отлаживаемым микроконтроллером C166.

Модель воспроизводит в реальном времени сигнал, пропорциональный перемещению поршня гидроцилиндра актуатора, который преобразуется цифро-аналоговым преобразователем и подается в микроконтроллер C166. Микроконтроллер C166 преобразует эти сигналы с помощью аналого-цифрового преобразователя, фильтрует и формирует на их основе сигнал управления.

Управляющие сигналы, генерируемые микроконтроллером, через преобразователь «цифра-цифра» подаются в компьютерную модель управления положением колесной пары.

Составной частью МАСУКП является программатор, работа которого осуществляется программным обеспечением на определенной аппаратной и программной платформе [12].

Программное обеспечение управляющего модуля должно содержать: программные средства, осуществляющие сбор, фильтрацию и статистическую обработку измерительной информации; управляющие алгоритмы программы, экспертную систему реального времени; базу данных накопления информации; базу знаний о управляемом движении колесной пары в рельсовой колее [13, 14].

Программное обеспечение, используемое для моделирования:

1. Matlab/Simulink.
2. Библиотека драйверов устройства входа/выхода: комплекс predeterminedных блоков, соответствующих функциям, выполняемым в аппаратной среде.
3. Программное обеспечение, генерирующее код для автоматического построения модели в реальном времени (Microsoft Visual studio, Watcom C/C+).
4. Интерфейс пользователя для наблюдения за данными и изменения параметров.

Последовательность выполняемых функций:

1. Обработка имитационной модели в Matlab/Simulink.

2. Соединение модели с соответствующим драйвером платы входа/выхода.
3. Преобразование описания модели в С-код (RTW), компилирование и загрузка.
4. Наблюдение сигналов в реальном времени и регистрирование данных (Matlab/Simulink).
5. Программирование микроконтроллера C166 через программное обеспечение Keil.

МАСУКП должна использоваться не только для регулирования и управления процессом движения колесной пары РТС в горизонтальной плоскости, но и выполнять ряд специализированных функций, например, распознавание нештатных ситуаций и реагирование на них.

Данные, полученные в результате измерений, должны с требуемой точностью отображать динамику процесса, что в первую очередь определяется частотой выборки, т.е. периодичностью измерения новых данных. При этом важно достигнуть баланса: слишком высокая частота выборки требует частого обращения компьютера к измерительным устройствам и усложняет работу программы, при слишком низкой частоте выборки возможно отставание управляющего воздействия от реального хода физического процесса.

Цифровые системы управления работают только с информацией, представленной в цифровой форме, поэтому полученные в результате измерений электрические аналоговые величины обрабатываются с помощью АЦП.

Генерируемые датчиками сигналы имеют весьма низкий уровень, поэтому их необходимо усиливать. Кроме того, сопротивления выхода датчика, кабеля и входа управляющего компьютера согласованы. Сигнал датчика отфильтровывается до того, как он поступает на вход компьютера. Схема обмена информацией в системе «процесс – управляющий компьютер» представлена на рис. 1.

На основе проведенного анализа существующих операционных систем реального времени выбрана ОС QNX, как наиболее подходящая для эффективной работы управляющего компьютера и системы управления положением колесных пар РТС в целом. Учитывая гибкость QNX, ее надежность, быстродействие и постоянное развитие, можно сделать вывод, что из всех операционных систем она наиболее подходит для задач управления в реальном масштабе времени [15].

В связи с тем, что к системам управления колесными парами РТС предъявляются жесткие требования по временным интервалам, то необходимо использовать СУБД РВ [16]. Для таких систем и особенно ресурсо-зависимых встроенных систем, необходимо найти удачный баланс между промежуточным состоянием и вычислительными затратами.

Применение Toolbox Real-Time Target состоит в управлении в реальном времени, обработке сигналов и моделировании работы аппаратуры с обратными связями. Сгенерированный код выполняется с высокой скоростью в режиме реального времени на операционной системе QNX с использованием стандартных интерфейсных плат. При запуске модели в режиме реального времени, Real-Time Target принимает данные из одного или нескольких входных каналов, использует эти данные, как входные для блок-диаграммы модели, немедленно обрабатывает их и направляет обратно на выходной канал интерфейсной платы.

Сигналы принимаются и наблюдаются при помощи Simulink-осциллографических выводных блоков, позволяющих наблюдать поведение моделируемой системы в режиме реального времени. Simulink позволяет изменять параметры вывода сигналов при помощи простого редактирования блок-диаграмм в процессе моделирования. Новые значения параметров автоматически преобразуются в компилированную версию блок-диаграммы в процессе моделирования в реальном времени.

Связь контроллера и бортового компьютера осуществляется с помощью шнура или через параллельный интерфейс. В процессе работы контроллер передает в режиме реального времени на бортовой компьютер данные, необходимые для визуализации и протоколирования.

При разработке МАСУКП сложной задачей является получение информации об угле набегания колес РТС на рельс [12]. Одним из путей измерения угла набегания колеса на рельс является использование метода акустической эмиссии (АЭ), основанного на изменении уровня звукового давления в зависимости от параметров силового взаимодействия гребня колеса с головкой рельса. Чем больше угол набегания колесной пары на рельс, тем больше усилие в

контакте колесо-рельс. При нулевом значении угла набегания силовое взаимодействие гребня колеса с головкой рельса и уровень звукового давления снижается [17]. Однако, следует отметить, что метод АЭ не чувствителен к направлению сбега или набегания колеса на рельс. Кроме того, сигнал обратной связи получаемый от направленного в контакт колеса с рельсом микрофона, подвержен помехам, поэтому на микроконтроллере должен быть предусмотрен цифровой фильтр.

Рис. 1. Схема обмена информации в системе управления

При управляемом движении колесной пары РТС в криволинейных участках рельсовой колеи одной из основных задач является также определение текущего положения экипажа на участке рельсового пути и направления кривизны этого участка [18].

Функциональная схема мехатронной САУ положением колесных пар в рельсовой колее приведена на рис. 2.

Рис. 2. Функциональная схема МАСУКП

Управляющее воздействие регулятора формируется с учётом направления закругления на участке рельсового пути. Угол набегания регулируется исполнительными механизмами (актуаторами) путём соответствующего перемещения их штоков [19, 20].

Направление закругления определяется по изменению направления векторов скорости движения по оси абсцисс и по оси ординат. Реализация алгоритма определения направления закругления приведена в [18].

Авторами проработан один из вариантов реализации МАСУКП для примера трехосной тележки тепловоза 2ТЭ116. В качестве исполнительных механизмов (актуаторов) для поворота

крайних колесных пар тележки рассматривались варианты со встроенными в буксовые поводки гидро- или пневмоцилиндрами.

К параметрам, характеризующим пневматическую часть системы, относятся: время наполнения цилиндров и установившееся давление воздуха в цилиндрах. Механическая часть цилиндра характеризуется: площадью и ходом поршня.

Зависимость реализуемого угла поворота колесной пары и выхода штока актуатора от радиуса криволинейного участка пути приведена на рис. 3. Схема усовершенствованной конструкции тележки локомотива представлена на рис. 4, схема МАСУКП изображена на рис. 5.

МАСУКП обрабатывает сигналы от спутникового приемника глобального позиционирования, инерциального блока и датчика АЭ по уровням которых формируется управляющее воздействие на открытие или закрытие соответствующих электромагнитных клапанов. При появлении сигнала рассогласования, микропроцессорным блоком формируется управляющее воздействие на открытие электромагнитного клапана воздушной и гидравлической магистрали. При отсутствии сигнала рассогласования происходит закрытие клапанов воздушной и гидравлической магистрали.

Рис. 3. Зависимость угла поворота колесной пары и выхода штока актуатора от радиуса кривой

Благодаря действию гидроцилиндров приводов, крайние колесные пары тележек устанавливаются в радиальном положении. Это значительно снижает угол атаки их колес на рельсы, уменьшаются и стабилизируются поперечные перемещения, что способствует поддержанию устойчивого движения локомотива и снижению сопротивления движению.

Теоретическое исследование движения экипажа тепловоза 2ТЭ116 в кривом участке пути выполнено по исходным данным, которые соответствуют параметрам эксперимента, представленным в [18,19]. Сравнительные результаты смоделированного движения серийного тепловоза 2ТЭ116 и локомотива с системой контроля положения колесной пары по кривой с радиусом 300 м и скоростью 70 км/ч представлены на рис. 6.

Для моделирования системы использованы те же исходные данные и техника моделирования, что и в [20]. Моделирование движения усовершенствованной трехосной тележки тепловоза 2ТЭ116 с МАСУКП в сравнении со штатной тележкой показало возможность снижения направляющих сил до 35% и минимизации углов набегания крайних колесных пар тележки на рельсы.

Рис. 4. Схема усовершенствованной конструкции тележки с МАСУКП:

1 – рама тележки; 2 – буксовые узлы; 3 – буксовые гидроцилиндры; 4 – пневмогидроцилиндр; 5 – дросель; 6 – воздушная магистраль; 7 – рамный гидроцилиндр; 8 – блок распределения давления; 9 – трубопроводы; 10 – датчик поворота тележки относительно кузова; 11 – микрофоны; 12 – спутниковый приемник; 13 – инерциальный блок

Рис. 5. Схема МАСУКП:

1 – рама тележки; 2 – буксовые узлы; 3 – буксовые гидроцилиндры; 4 – пневмогидроцилиндр; 5 – дросель; 6 – воздушная магистраль; 7 – рамный гидроцилиндр; 8 – блок распределения давления; 9 – трубопроводы; 10 – датчик поворота тележки относительно кузова; 11 – микрофоны; 12 – спутниковый приемник; 13 – инерциальный блок.

Рис. 6. Расчетные значения угла атаки первой колесной пары тележки тепловоза 2ТЭ116 ($R = 300$ м, $V = 70$ км / ч):

1 – контролируемое движение, 2 – неуправляемое движение

Выводы. В статье проанализирован один из способов обеспечения оптимального взаимодействия колес железнодорожного транспорта с рельсами с минимальными поперечными силами и низким уровнем износа, заключающийся в использовании мехатронных систем управления положением колесных пар в горизонтальной плоскости для их радиальной установки в кривых участках рельсовой колеи. Сформулированы требования для выбора рациональных характеристик аппаратного и программного обеспечения, обеспечивающего техническую реализацию таких мехатронных систем.

Представленная мехатронная система управления положением колесных пар позволяет оптимально устанавливать их на рельсовом пути при различных условиях движения рельсового экипажа. Это позволяет снизить направляющие силы (например, для моделирования движения трехосной тележки тепловоза 2ТЭ116) - до 35%) и минимизировать углы набегания колесных пар на рельсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goodall R., Bruni S., Mei T., 2006: Concepts and prospects for actively-controlled railway running gear. *Vehicle System Dynamics*. 44 (suppl). 60-70.
2. Mei T., Li H., 2008: Control design for the active stabilization of rail wheelsets. *Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*. Vol.130. Article number 011002.
3. Spiryagin M., Spiryagin V., Ulshin V. Active steering control of a rail vehicle: A new approach // *Annals of DAAAM for 2008 & Proceeding of the 19th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation"*. DAAAM International, (Vienna, Austria), 2008. P.P. 1279-1280.
4. Mikhaylov E., Semenov S., Dižo J., Kravchenko K. Research of possibilities of reducing the driving resistance of a railway vehicle by means of the wheel construction improvement. *Transportation Research Procedia*. Vol. 40, 2019. PP. 831–838. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.117>.
5. Mikhailov, E., Semenov, S., Tkachenko, V. & Saponova, S. Reduction of Kinematic Resistance To Movement Of the Railway Vehicles. *MATEC Web of Conferences*. 235. 00033. *Horizons of Railway Transport 2018*. P.P.1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500033>
6. Scheffel H., Tornay H. The mechanism of the rotatable lemniscate suspension applied to bogies having selfsteering wheelsets. *Vehicle System Dynamics*, 2007. Ed. №17. 368-380.
7. Шеффель, Х. Радиально устанавливающиеся колесные пары электровозов // *Железные дороги мира*, 1989. № 2. С. 74–76.
8. Kobayashi, H. The new bogies for diesel-trans Japan railways // *Quarterly Report of RTRI*, 2000. № 1. PP. 16–20.
9. Upadhyay, R. Reduced wear wheels and rails // *International Railway Journal*, 2000. № 7. PP. 33–34.
10. Meli E., Malvezzi M., Papini S., Pugi L., Rinchi M., Rindi A. A railway vehicle multibody model for real time applications. *Vehicle System Dynamics*, 2008. 46 (12). PP. 1083-1105.
11. Корзина И.В. Имитационная модель электровоза для отладки микропроцессорных систем управления : дисс. канд. техн. наук: 05.22.07. М.: МИИТ, 2007.

12. Ключев С.А. Применение тактируемой архитектуры в системах автоматического управления в рельсовых транспортных средствах. *Вестник ВНУ им. В.Далы. Луганск: ВНУ им. В.Далы*, 2009. Вып. № 1 (131). С. 64-67.
13. Ульшин В.А., Ключев С.А. Разработка программного и аппаратного обеспечения для создания системы автоматического управления положением колесных пар локомотива в плане // *Вестник ВНУ им. В.Далы. Луганск: ВНУ им. В.Далы*, 2014. Вып. № 3 (210). С. 269–271.
14. Ульшин В.А., Ключев С.А. Разработка программного и аппаратного обеспечения для создания системы автоматического управления положением колесных пар локомотива в плане // *Сборник науч. работ междунар. научно-практич. конф. “Інноваційні технології на залізничному транспорті”*. Лондон, 2014. С. 93–94.
15. Спирягин М.И., Спирягин В.И., Ключев С.А. Выбор направлений для создания модели системы управления транспортным средством // *Вестник Восточноукр. нац. ун-та. Луганск: ВНУ*, 2007. Вып. № 12 (118). С. 203–208.
16. Спирягин М.И., Спирягин В.И., Спирягин К.И., Ключев С.А. Анализ баз данных для створення системи керування транспортним засобом // *Вестник ВНУ им. В.Далы. Луганск: ВНУ им. В.Далы*, 2008. Вып. № 4 (122). С. 238–243.
17. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: Транспорт, 1997. 327 с.
18. Ключев С.А., Зубарь Е.В., Короп Г.В. Улучшение вписывания локомотивов на криволинейных участках пути управляемым разворотом колесных пар в горизонтальной плоскости // 11-я Всерос. межвузовская научно-практич. конф. «Актуальные проблемы экономики и управления на транспорте». ФБО «Морской гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского». Владивосток, 2013. С. 10–13.
19. Спосіб радіального устанавлення колісних пар візка рейкового транспортного засобу: Деклараційний патент на корисну модель 33465: МПК В61F5/00. Опубл. 25.06.2008. Бюл. № 12. 4с.
20. Мікропроцесорна система керування тяговою передачею локомотива: Деклараційний патент на корисну модель 31106: МПК В61F5/38. Опубл. 25.03.2008. Бюл. № 6. 4 с.

REFERENCES

1. Goodall R., Bruni S., Mei T. (2006). Concepts and prospects for actively-controlled railway running gear. *Vehicle System Dynamics*, 44, 60-70.
2. Mei T., Li H. (2008). Control design for the active stabilization of rail wheelsets. *Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*, 130, 011002.
3. Spiriyagin M., Spiriyagin V., Ulshin V. (2008). Active steering control of a rail vehicle: A new approach. *Annals of DAAAM for 2008 & Proceeding of the 19th International DAAAM Symposium “Intelligent Manufacturing & Automation”*. DAAAM International, (Vienna, Austria), 1279-1280.
4. Mikhaylov E., Semenov S., Dižo J., Kravchenko K. (2019). Research of possibilities of reducing the driving resistance of a railway vehicle by means of the wheel construction improvement. *Transportation Research Procedia*, 40, 831–838. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.117>.
5. Mikhailov, E., Semenov, S., Tkachenko, V. & Saponova, S. (2018). Reduction of Kinematic Resistance To Movement Of the Railway Vehicles. *MATEC Web of Conferences*. 235. 00033. *Horizons of Railway Transport*, 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500033>.
6. Scheffel H., Tornay H. (2007). The mechanism of the rotatable lemniscate suspension applied to bogies having selfsteering wheelsets. *Vehicle System Dynamics*, 17, 368-380.
7. Sheffel' H. (1989). Radial'no ustanavlivaushiesja kolesnye pary jelektrovozov [Radially mounted wheelsets of electric locomotives]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the world*, 2, 74–76 [in Russian].
8. Kobayashi H. (2000). The new bogies for diesel-trans Japan railways. *Quarterly Report of RTRI*, 1, 16–20.
9. Upadhyay R. (2000). Reduced wear wheels and rails. *International Railway Journal*, 7, 33–34.
10. Meli E., Malvezzi M., Papini S., Pugi L., Rinchi M., Rindi A. (2008). A railway vehicle multibody model for real time applications. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46 (12), 1083-1105.
11. Korzina I.V. (2007). Imitacionnaja model' jelektrovoza dlja otladki mikroprocessornyh sistem upravlenija [Simulation model of an electric locomotive for debugging microprocessor control systems]. *Candidate's thesis*. Moscow. [in Russian].
12. Kljuev S.A. (2009). Primenenie taktiruemoj arhitektury v sistemah avtomaticheskogo upravlenija v rel'sovyh transportnyh sredstvah [The use of clocked architecture in automatic control systems in rail vehicles]. *Vestnik VNU im. V.Dalja. Lugansk: VNU im. V.Dalja*, 1 (131), 64-67. [in Russian].
13. Ul'shin V.A., Kljuev S.A. (2014). Razrabotka programmnogo i apparatnogo obespechenija dlja sozdanija sistemy avtomaticheskogo upravlenija polozheniem kolesnyh par lokomotiva v plane [Development of software and hardware for creating a system for automatically controlling the position of locomotive wheelsets in plane]. *Vestnik VNU im. V. Dalja. Lugansk: VNU im. V. Dalja*, 3 (210), 269–271. [in Russian].
14. Ul'shin V.A., Kljuev S.A. (2014). Razrabotka programmnogo i apparatnogo obespechenija dlja sozdanija sistemy avtomaticheskogo upravlenija polozheniem kolesnyh par lokomotiva v plane [Development of software and hardware for creating a system for automatically controlling the position of locomotive wheelsets in plane]. *Sbornik nauch. rabot mezhdunar. nauchno-praktich. konf. “Інноваційні технології на залізничному транспорті”* - Collection of scientific. international work scientific and practical conf. “Innovative technologies on railway transport”. London, 93–94. [in Russian].

15. Spirjagin M.I., Spirjagin V.I., Kljuev S.A. (2007). Vybory napravlenij dlja sozdanija modeli sistemy upravlenija transportnym sredstvom [The choice of directions for creating a model of a vehicle control system]. Vestnik VNU. Lugansk: VNU, 12 (118), 203–208. [in Russian].
16. Spirjagin M.I., Spirjagin V.I., Spirjagin K.I., Kljuev S.A. (2008). Analiz baz danih dlja stvorennja sistemi keruvannja transportnim zasobom [Database analysis to create a vehicle management system]. Vestnik VNU im.V.Dalja. Lugansk : VNU im. V.Dalja, 4 (122), 238–243. [in Ukrainian].
17. Kogan A.Ja. (1997). Dinamika puti i ego vzaimodejstvie s podvizhnyj sostavom [Track dynamics and its interaction with rolling stock]. Moskva: Transport. [in Russian].
18. Kljuev S.A., Zubar' E.V., Korop G.V. (2013). Uluchshenie vpisyvanija lokomotivov na krivolinejnyh uchastkah puti upravljajemym razvorotom kolesnyh par v gorizontальной ploskosti [Improving the curving of locomotives on curved sections of the track by a controlled turn of wheel pairs in a horizontal plane]. 11-ja Vseros. mezhvuzovskaja nauchno-praktich.konf. «Aktual'nye problemy jekonomiki i upravlenija na transporte». FBO «Morskoj gos. un-t im. adm. G.I. Nevel'skogo» - 11th All-Russian. interuniversity scientific and practical conference "Actual problems of the economy and transport management." TSF "Marine state. un-t them. adm. G.I. Nevelsky". Vladivostok, 10–13. [in Russian].
19. Spisib radial'nogo ustanovlennja kolisnih par vizka rejkovogo transportnogo zasobu [Method of radial installation of wheel pairs of rail vehicle trolley]: Deklaracijnij patent na korisnu model' - Declarative utility model patent 33465: MPK B61F5/00. Publ. 25.06.2008, 12. [in Ukrainian].
20. Mikroprocesorna sistema keruvannja tjagovoju peredacheju lokomotiva [Microprocessor locomotive traction control system]: Deklaracijnij patent na korisnu model' - Declarative utility model patent 31106: MPK B61F5/38. Publ. 25.03.2008, 6. [in Ukrainian].

Горбунов М.І., д.т.н.

(професор кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля)

Клюєв С.А., к.т.н.

(доцент кафедри логістичного управління і безпеки руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля)

Михайлов Є.В., к.т.н.

(доцент кафедри логістичного управління і безпеки руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля)

Семенов С.О., к.т.н.

(доцент кафедри логістичного управління і безпеки руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля)

Ковтанець М.В., к.т.н.

(доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля)

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОЛОЖЕННЯМ КОЛІСНИХ ПАР

Сформульовано вимоги до характеристик апаратного і програмного забезпечення, що необхідне для технічної реалізації мехатронних систем керування положенням колісних пар рейкових екіпажів в горизонтальній площині для їх радіальної установки в криволінійних ділянках колії з метою забезпечення оптимальної взаємодії коліс і рейок, яке характеризується мінімальними бічними силами і зниженням зносу. Запропонована схема мехатронної системи позиціонування колісних пар дозволяє оптимально встановлювати їх на рейковій колії при різних умовах руху екіпажу. Результати розрахунків, виконаних на прикладі руху в кривій тривісного візку тепловоза 2ТЕ116, показали можливість значного зменшення напрямних сил і мінімізації кутів набігання колісних пар.

Ключові слова: рейковий екіпаж, колісна пара, радіальна установка, управління, актуатор, мехатронна система.

Gorbunov N.I., Doctor of Technical Sciences

(Professor, Department of Railway, Road Transport and Hoisting-and-Transport Machines, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University)

Klyuev S.A., Ph.D.

(Associate Professor of the Department of Logistic Management and Traffic Safety in Transport, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University)

Mikhailov E.V., Ph.D.

(Associate Professor of the Department of Logistic Management and Traffic Safety in Transport, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University)

Semenov S.A., Ph.D.

(Associate Professor of the Department of Logistic Management and Traffic Safety in Transport, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.)

Kovtanets M.V., Ph.D.

(Associate Professor, Department of Railway, Road Transport and Hoisting-and-Transport Machines, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.)

SUBSTANTIATION OF RATIONAL CHARACTERISTICS OF MECHATRONIC CONTROL SYSTEMS OF POSITION OF WHEEL PAIRS

The article analyzes the schematic diagrams of rail vehicles with radial installation of wheelsets. Radial installation of wheelsets in curved sections of the track allows for optimal interaction of wheels and rails. This interaction is characterized by minimal lateral forces in the contact of the wheels and the rails and a decrease in wear of their contacting surfaces. Requirements are formulated for the characteristics of hardware and software that will ensure the technical implementation of mechatronic control systems for the position of wheel pairs of rail vehicles in the rail track in the horizontal plane. The devices included in the mechatronic automatic control system must represent a single closed system in which the parameters of various electrical, mechanical and hydraulic processes are inextricably linked. Due to the high requirements for reliability and time constraints to the formation and transmission of the control signal to the actuators, the operation of such a system for rail vehicles should be carried out in real time. A schematic diagram of a mechatronic positioning system for wheel sets is proposed, which allows them to be optimally mounted on a railses under various conditions of vehicle movement. On the example of movement a three-axle bogie of a 2TE116 diesel locomotive in the curve, comparative calculations are made. The calculation results showed the possibility of a significant reduction in the guiding forces and minimizing the attac angles of the wheelsets of the modernized bogie in comparison with the standard design bogie.

Keywords: *rail vehicle, wheelset, radial installation, control, actuator, mechatronic system.*