

Система стабилизации платформы железнодорожного грузоподъемного крана

Д. А. ПОТАХОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО «ПГУПС»), г. Санкт-Петербург, 190031, Россия

Аннотация. При эксплуатации железнодорожного крана в кривых участках пути возможны сход колесных пар ходовых тележек крана с рельсовой колеи при его смещении в процессе вывешивания на выносных опорах, непопадание колесной пары ходовой тележки на рельсовую колею после выполнения работ и снятия крана с выносных опор, что значительно сказывается на выполнении погрузо-разгрузочных работ. Одной из причин возникновения подобных опасных ситуаций является не строго горизонтальное положение неповоротной платформы железнодорожного крана.

Железнодорожные грузоподъемные краны входят в состав восстановительных поездов, предназначенных для ликвидации последствий сходов с рельсов подвижного состава. Приоритетной задачей для восстановительных поездов является сокращение времени ликвидации последствий транспортных происшествий, которого можно добиться за счет применения новых или усовершенствованных приспособлений или методов.

В статье описывается система автоматической стабилизации (горизонтирования) платформы грузоподъемного крана на железнодорожном ходу (на примере крана типа ЕДК 500/1) при его движении в кривых участках пути (рассматривается движение железнодорожного крана на относительно небольших скоростях (до 50 км/ч)).

С целью исследования модернизированной технической системы (грузоподъемный кран, оснащенный системой автоматической стабилизации платформы) проводится ее математическое имитационное моделирование. На начальном этапе в системе автоматизированного проектирования SolidWorks создается твердотельная цифровая модель железнодорожного крана в сочетании с участком железнодорожного пути; разработанная твердотельная модель транслируется в среду SimMechanics MATLAB. Далее с целью повышения адекватности моделирования разработанная динамическая модель дорабатывается при помощи интеграции библиотек программы MATLAB (SimMechanics, SimHydraulics, Fuzzy Logic Toolbox и др.) для учета взаимодействия элементов различной физической природы. Приводятся результаты моделирования модернизированной технической системы, которые подтверждают целесообразность использования системы стабилизации на железнодорожных грузоподъемных кранах при прохождении кривых участков пути.

Ключевые слова: железнодорожный подъемный кран; система стабилизации; динамическое моделирование; SimMechanics; SimHydraulics; Fuzzy Logic Toolbox

Введение. Согласно данным ОАО «РЖД» (распоряжение ОАО «РЖД» от 24.12.2014 г. № 3107р «Об утверждении сводного тематического плана для

рационализаторов ОАО «РЖД»»), при выполнении работ грузоподъемными кранами в кривых участках пути существует опасность схода колесных пар ходовых тележек крана с рельсовой колеи при его смещении в процессе вывешивания на выносных опорах, а также непопадания колесной пары ходовой тележки на рельсовую колею после выполнения работ и снятия крана с выносных опор. Эти технические недостатки осложняют выполнение погрузо-разгрузочных работ в кривых участках пути, а порой делают их невозможными. Главной причиной является не строго горизонтальное положение неповоротной платформы железнодорожного крана при работе в кривых, при котором поверхности выносных опор крана находятся на разных уровнях по высоте.

Правилами по охране труда для работников восстановительных поездов ОАО «РЖД» [1] работа железнодорожного крана без выносных опор запрещается. В некоторых случаях это ведет к снижению производительности, качества путевых работ и ограничению использования железнодорожных кранов. Однако потребность выполнения механизированных погрузо-разгрузочных работ в кривых участках пути объективно существует, особенно в случаях схода подвижного состава с рельсов (аварийно-восстановительные работы), выполнения путевых работ в кривых, а также в случае производства работ в ограниченном пространстве (например, в туннелях). Обеспечить работоспособность железнодорожного крана при максимальном значении возвышения наружного рельса в кривой в условиях ограниченного пространства возможно за счет контроля горизонтального положения платформы.

Существующий парк грузоподъемных кранов (как и других технических средств) восстановительных поездов железных дорог Российской Федерации обновляется медленно. Решением проблемы может стать модернизация технических средств восстановительных поездов и повышение надежности работы отдельных узлов и агрегатов за счет применения современных методов, материалов и устройств.

Описание предложенного технического решения. Анализ мирового опыта организации современного пассажирского движения показывает, что эффективным

■ E-mail: potakhovd@mail.ru (Д. А. Потехов)

решением, увеличивающим скорость движения при одновременном обеспечении высоких показателей комфорта, является использование подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова в кривых [2, 3, 4]. Положительный эффект достигается за счет наклона кузова внутрь кривой. Успешный опыт применения данной системы обосновывает актуальность создания аналогичных систем и для другого типа подвижного состава.

В настоящей статье рассмотрен вопрос оснащения дизель-электрического железнодорожного крана (на примере железнодорожного крана ЕДК 500/1) системой автоматической стабилизации (горизонтирования) платформы при движении на относительно небольших скоростях (до 50 км/ч), включающей в себя: гидросистему с четырьмя гидроцилиндрами двойного действия, гидрораспределителями, насосами, фильтрами, предохранительными клапанами, гидробаком и дросселями (рис. 1). Данная система имеет датчики давления, размещенные в полостях гидроцилиндров, и блок управления.

Гидроцилиндры размещаются на каждой ходовой тележке с обеих сторон и крепятся к крановой неповоротной платформе. Гидравлическая система крана подключена к следящей системе управления, работа которой основана на алгоритмах нечеткой логики. Наклон платформы и контроль устойчивости железнодорожного крана осуществляется по выходным данным «Программы контроля и управления грузовой и собственной устойчивостью транспортного средства» [5].

Создание и настройка среды имитационного моделирования. С целью исследования модернизированной технической системы железнодорожного крана ЕДК 500/1 с системой стабилизации платформы было выполнено ее математическое моделирование.

Ввиду того, что виртуальная реальность многих САД-моделей системы автоматизированного проектирования (САПР) представляет собой цифровую среду, где приводы технического объекта моделируются без полного учета их природы, характеристики такой имитационной системы в какой-то степени будут отличаться от реальной технической системы. Поэтому с целью повышения адекватности моделирования характеристики виртуальной реальности должны быть скорректированы с учетом взаимодействия элементов различной физической природы. Интеграция библиотек программы MATLAB (SimMechanics, SimHydraulics и др.) в среде Simulink в сочетании с возможностью программного управления позволяют это осуществить [6, 7].

Используемое программное обеспечение MATLAB позволяет проводить исследования моделей САПР, разработанных в САД-системах (SolidWorks, Autodesk Inventor, Pro/ENGINEER) [8]. Для этого необходимо транслировать САД-модель в SimMechanics при по-

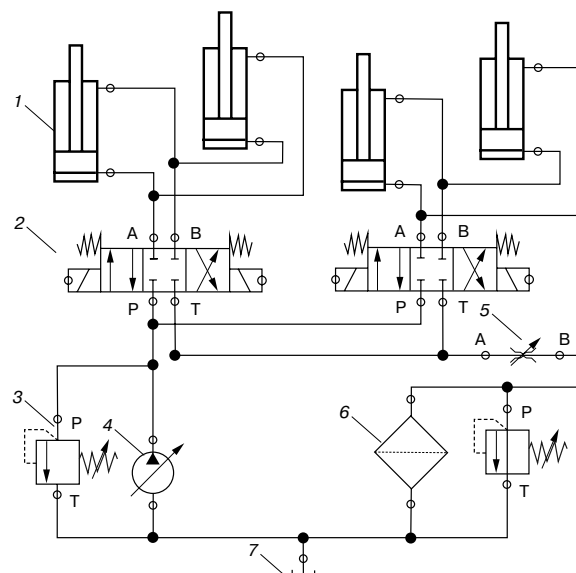


Рис. 1. Принципиальная гидросхема системы стабилизации платформы железнодорожного крана:
1 — гидроцилиндр; 2 — гидрораспределитель; 3 — предохранительный клапан; 4 — насос; 5 — дроссель; 6 — фильтр; 7 — гидробак

Fig. 1. Basic hydraulic diagram of the platform stabilization system of railway crane:
1 — hydraulic cylinder; 2 — hydraulic valve; 3 — safety valve; 4 — pump; 5 — throttle; 6 — filter; 7 — hydraulic reservoir

мощи специализированного САД-транслятора [8]. В этом случае SimMechanics автоматически преобразует твердотельную трехмерную модель с установленными связями между элементами модели в эквивалентную цифровую модель, сохраняя физическую структуру механизма, геометрические и кинематические отношения его компонентов. Использование данного транслятора значительно облегчает и повышает качество трехмерного моделирования (особенно при исследовании динамического нагружения), так как в САД-системах значительно легче разрабатывать 3D-модели, а при помощи библиотек Simulink программы MATLAB создавать адекватные приводы механизмов.

Исследуемую модель можно условно разбить на следующие взаимосвязанные подсистемы: механическая часть (железнодорожный кран, железнодорожный путь), гидравлическая часть (механизм наклона платформы), привод механизма передвижения, система программного управления.

На первом этапе в САД-системе SolidWorks создается твердотельная цифровая модель на основе железнодорожного крана ЕДК 500/1 в сочетании с участком железнодорожного пути [9, 10]. Механизмы в модели условно учтены сосредоточенными массами, элементы металлоконструкции, не оказывающие значимое влияние, исключены. Адекватность цифровой САД-модели своему прототипу подтверждается удовлетворительной сходимостью значений реакций выносных опор модели с реакциями рассматриваемого крана, полученных

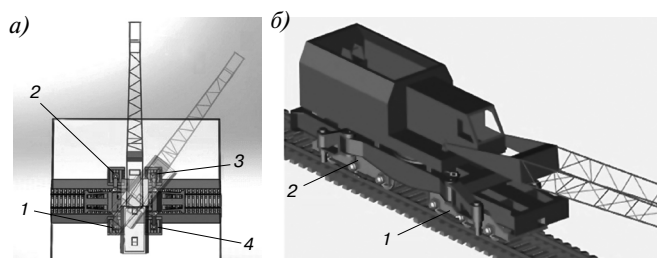


Рис. 2. Расчетные схемы крана:

a — стрела под углом 90° от оси железнодорожного пути;
 1–4 — выносные опоры крана; *b* — стрела в направлении движения крана; 1–2 — ходовые тележки крана
 Fig. 2. Crane design schemes:
a — arm at an angle of 90° from the axis of the railway track;
 1–4 — crane outriggers; *b* — arm in the direction of crane motion;
 1–2 — crane bogies

предприятием-изготовителем при приемо-сдаточных испытаниях (паспорт крана; рис. 2, *a, б*; табл. 1, 2).

На основе данной твердотельной модели при использовании специализированного CAD-транслятора создается модель железнодорожного крана ЕДК 500/1 в среде SimMechanics (рис. 2, *б*). Модель SimMechanics представляет схему, состоящую из соединенных между собой блоков, которые определяют физические свойства элементов (масса, момент инерции), координаты характерных точек тел, возможное движение (степени свободы) и связи одной части механизма

относительно другой [8]. При необходимости происходит «доработка» модели: удаление или изменение связей между блоками.

В среде Simulink при помощи библиотеки SimHydraulics создается принципиальная модель гидропривода предложенной системы стабилизации; в полостях гидроцилиндров устанавливаются датчики давления p_1, p_2, p_3, p_4 (рис. 3) [11, 12]. Разработанная Simulink-модель гидропривода учитывает сжимаемость жидкости, трение между подвижными частями в гидроцилиндре, инерцию жидкости и потери в трубопроводе.

Принудительный наклон платформы железнодорожного крана осуществляется на основе определения текущего положения центра масс (ПЦМ) [5]. Собственная и грузовая устойчивость крана гарантируется нахождением проекции ПЦМ на плоскость опирания в пределах определенной зоны — ядра опирания. Опирание происходит в точках, соответствующих местоположению опорных устройств (гидроцилиндров).

Система работает следующим образом:

- информационный поток от датчиков давления рабочей жидкости в полостях гидроцилиндров поступает в блок управления;
- данные датчиков давления заносятся в соответствующую ячейку квадратной матрицы A (рис. 4);
- считая значения давления материальными точками, где сосредоточена определенная часть массы грузоподъемного средства, определяется текущее ПЦМ согласно формуле [13, 14]:

$$x_{\text{ЦМ}} = \left(\sum_{i=1}^n m_i x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n m_i \right)^{-1};$$

$$y_{\text{ЦМ}} = \left(\sum_{i=1}^n m_i y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n m_i \right)^{-1},$$

где: $x_{\text{ЦМ}}, y_{\text{ЦМ}}$ — координаты центра масс системы; m_i — массы материальных точек, входящих в систему, кг; x_i, y_i — координаты материальных точек системы; n — количество материальных точек.

В представленной формуле вместо масс m_i подставляются значения давления рабочей жидкости в опорных гидроцилиндрах P_i (Па). При помощи блоков библиотек Simulink эта формула воспроизводится в той же области, что и модель железнодорожного крана для обработки данных в режиме реального времени.

Система управления непрерывно отслеживает проекцию ПЦМ грузоподъемной машины на плоскость опирания в пределах опорного контура и осуществляет приложение дополнительных нагрузок со стороны опорных гидроцилиндров, приводящих платформу крана в горизонтальное положение.

Изменения ПЦМ зависит от скорости движения железнодорожного крана v и параметров кривой (ра-

Таблица 1

Реакции выносных опор крана, кН

(расчетная схема рис. 2, *a*, стрела под углом 90° от оси железнодорожного пути)

Table 1

Reactions of crane outriggers, kN

(design scheme fig. 2, *a*, arm at an angle of 90° from the axis of the railway track)

Опоры	Вылет 10,0 м, груз 20 т		Вылет 17,0 м, груз 10 т	
	Паспорт крана	Цифровая модель	Паспорт крана	Цифровая модель
Опоры 2, 3	515	511	490	481
Опоры 1, 4	170	164	145	158

Таблица 2

Реакции колес крана, кН

(расчетная схема рис. 2, *б*, стрела в направлении движения крана)

Table 2

Crane wheel reactions, kN

(design diagram fig. 2, *б*, arm in the direction of crane motion)

Колеса	Вылет 21,0 м, груз 5 т		Вылет 17,0 м, груз 10 т	
	Паспорт крана	Цифровая модель	Паспорт крана	Цифровая модель
Тележка 1	137	142	156	153
Тележка 2	68	67	59	60

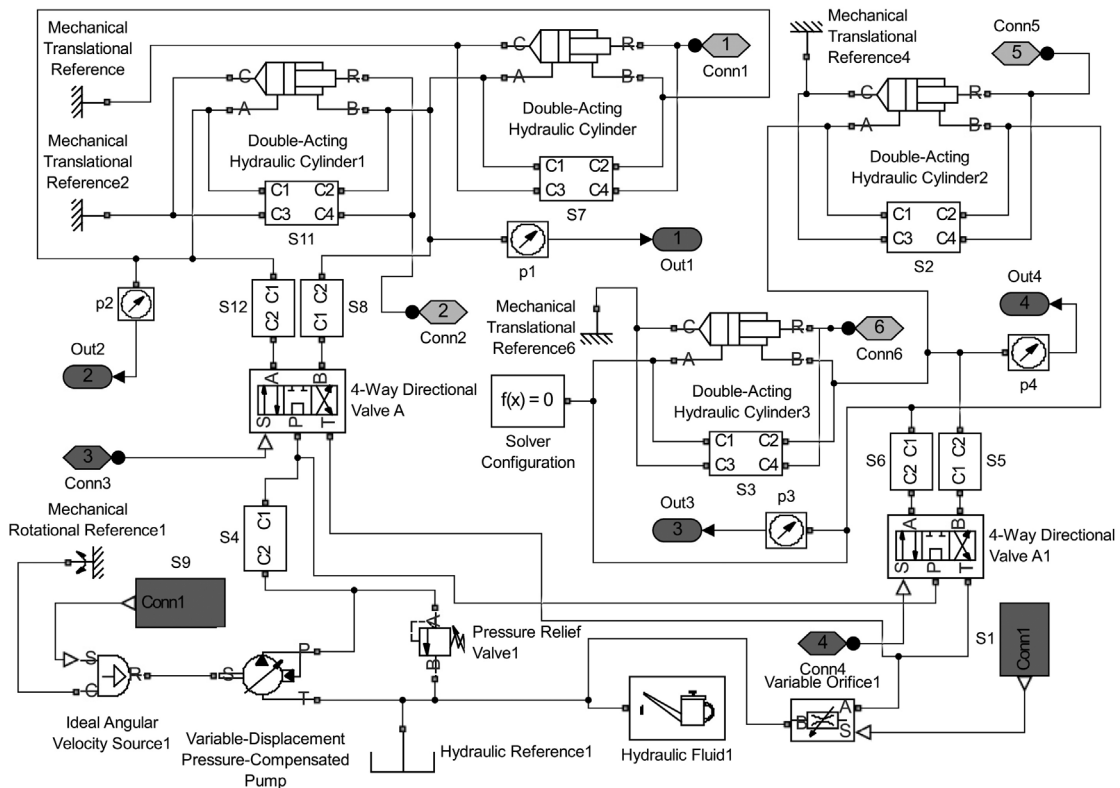


Рис. 3. Модель гидропривода системы стабилизации платформы железнодорожного крана
 Fig. 3. Model of the hydraulic drive of the railway crane platform stabilization system

диус кривой r , величина возвышения наружного рельса h железнодорожного пути). Управляющее воздействие зависит от следующих параметров гидросистемы: угловой скорости вала гидронасоса W , положения запорно-регулирующего элемента (золотника) гидрораспределителя z , площади проходного сечения дросселя S . Блок управления, основанный на алгоритмах нечеткой логики и теории нечетких множеств, осуществляет контроль и управление режимами работы насоса, гидрораспределителей, дросселей и скоростью движения крана и таким образом осуществляет приложение дополнительных нагрузок со стороны опорных гидроцилиндров, возвращающих ПЦМ платформы крана в горизонтальное положение. Применение нечеткой логики позволяет оптимизировать систему «изменение ПЦМ железнодорожного крана—управляющее воздействие».

Для реализации процесса нечеткого моделирования в программе MATLAB применяется специальный пакет Fuzzy Logic Toolbox [15, 16]. С целью создания системы нечеткого вывода в интерактивном режиме с помощью графических средств настраиваются «Редактор систем нечеткого вывода FIS (FIS Editor)», «Редактор функций принадлежности (Membership Function Editor)», «Редактор правил системы нечеткого вывода (Rule Editor)» пакета Fuzzy Logic Toolbox, в которых задаются и редактируются: свойства входных

и выходных переменных; функции принадлежности отдельных термов системы нечеткого вывода; отдельные правила системы нечеткого вывода [15, 16].

Далее моделируется привод механизма передвижения железнодорожного крана, который состоит из редуктора, индукционной муфты и электродвигателя.

На последнем этапе происходит объединение всех созданных подсистем железнодорожного крана, имеющих входы и выходы для взаимодействия с другими подсистемами в общей Simulink-модели,

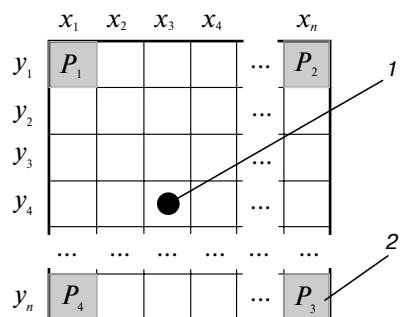


Рис. 4. Матрица значений проекции центра масс:
 1 — центр масс; 2 — положение опоры
 Fig. 4. Matrix of the mass projection center:

1 — center of mass; 2 — support position; x_1-x_n, y_1-y_n — coordinates of material points of the system; P_1-P_4 — pressure values in hydraulic cylinders

при помощи блоков библиотек SimMechanics, SimHydraulics, Fuzzy Logic Toolbox и других библиотек MATLAB. Это осуществляется посредством сенсорных блоков, блоков возбудителей, силовых упруговязких элементов, блоков конвертеров, специальных блоков и др. Созданная структурная интерактивная цифровая модель железнодорожного крана приведена на рис. 5. Субсистемы и блоки 6–11 представляют собой механическую часть железнодорожного крана, а блок 1 — моделирует передачу усилия из SimHydraulics в SimMechanics (рис. 5). Для удобства анализа в модель железнодорожного крана были добавлены подсистемы замера давления, расхода, сил взаимодействия, перемещений контрольных точек крана и других параметров системы; с целью обеспечения читаемости блок-схемы применялись блоки From и Goto, позволяющие создавать виртуальные связи между подсистемами без проведения видимых линий связи.

Программа MATLAB на основании составленных блок-схем синтезирует соответствующие дифференциальные уравнения и осуществляет их численное решение [6, 7].

Таким образом, получена единая имитационная среда моделирования объекта исследования, учитывающая взаимодействие элементов различной физической природы с учетом интегрированных алгоритмов управления.

Математическое моделирование модернизированной технической системы. С целью исследования

модернизированной технической системы осуществляется имитационное моделирование. В расчетах принято, что железнодорожный кран равномерно движется со скоростью, равной 20 км/ч: по прямому участку пути (t_0-t_1), по переходному участку пути (t_1-t_2), в кривой (t_2-t_3), далее опять по переходному участку пути (t_3-t_4), по прямому участку пути (t_4-t_5) (рис. 6). Принято, что железнодорожный путь не имеет микронеровностей, а максимальное значение возвышения наружного рельса в кривой $h = 150$ мм. Радиус кривой $r = 300$ м. Симуляция сопровождается трехмерной визуализацией (анимацией) движений моделируемой технической системы в виртуальной реальности, которая обеспечивает наибольшую наглядность в представлении ее работы (рис. 6).

Для начала движения железнодорожного крана подается сигнал из системы управления на привод механизма передвижения; кран движется со скоростью 20 км/ч. При движении железнодорожного крана по прямому участку пути золотник гидрораспределителя зафиксирован в нейтральном положении — вход-выход рабочей жидкости в полости гидроцилиндров заблокирован, давление в левых и правых гидроцилиндрах по ходу движения крана одинаковое; происходит удерживание платформы в горизонтальном положении.

При прохождении переходных и кривых участков пути система управления определяет ПЦМ по показаниям датчиков давления в зависимости от скорости

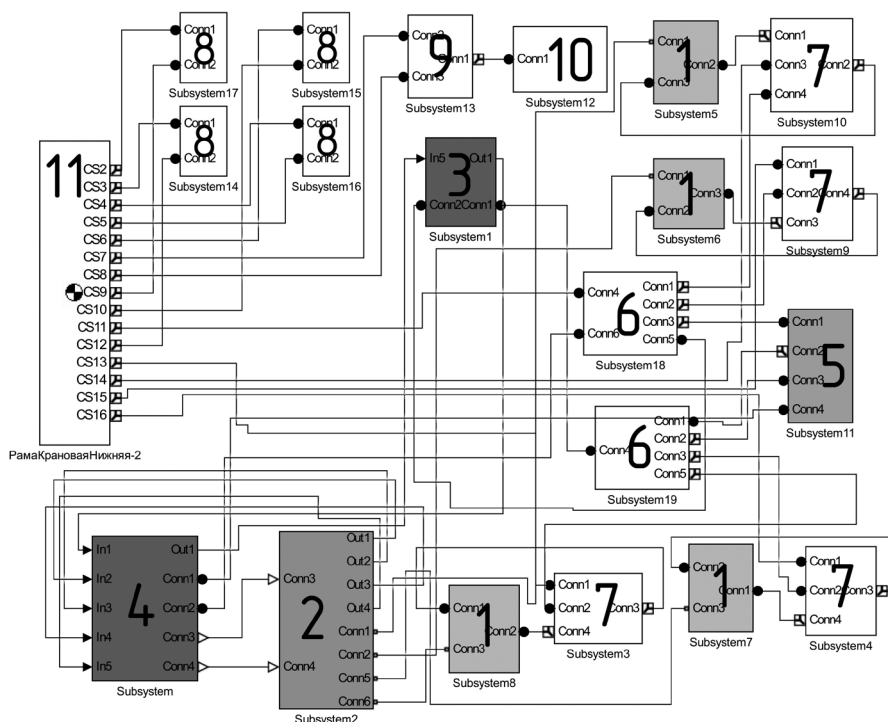


Рис. 5. Модель железнодорожного крана в системе Simulink.

- Субсистемы и блоки:
- 1 — передача усилия из SimHydraulics в SimMechanics; 2 — гидропривод механизма наклона платформы;
 - 3 — привод механизма передвижения;
 - 4 — программное управление;
 - 5 — рельсошпальная решетка;
 - 6 — ходовые тележки; 7 — гидроцилиндры механизма наклона платформы;
 - 8 — выносные опоры; 9 — поворотная платформа; 10 — ферменная стрела;
 - 11 — рама крановая

Fig. 5. Model of a railway crane in the Simulink system.

- Subsystems and blocks:
- 1 — transfer of effort from SimHydraulics to SimMechanics; 2 — hydraulic drive of the platform tilt mechanism; 3 — drive of the motion mechanism; 4 — software control; 5 — rail and sleeper grid;
 - 6 — bogies; 7 — hydraulic cylinders of the platform tilt mechanism; 8 — outriggers;
 - 9 — rotating platform; 10 — truss arm;
 - 11 — crane frame

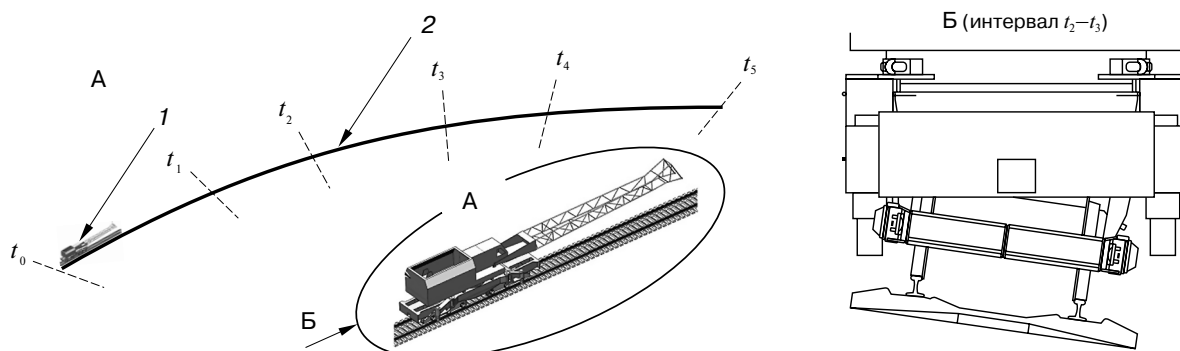


Рис. 6. Расчетная модель:
1 — железнодорожный кран; 2 — железнодорожный путь; t_0-t_5 — время.

Примечание. Балластная призма и насыпь скрыты

Fig. 6. Design model:

1 — railway crane; 2 — railway track; t_0-t_5 — time.

Note. Ballast prism and embankment are hidden

движения и скорости изменения возвышения наружного рельса. Далее в зависимости от скорости изменения ПЦМ система управления осуществляет регулирование на основе алгоритмов нечеткой логики: W — изменяет объемный расход насоса; z — устанавливает направление движения усилия гидроцилиндров и регулирует расход рабочей жидкости; S — обеспечивает необходимый режим скорости изменения положения поршня и штока относительно цилиндра, создавая сопротивление прохождению потока рабочей жидкости (при полном открытии дросселя скорость поршня максимальная; при полном закрытии дросселя вся подача насоса направляется через клапан на слив в бак, скорость поршня равна нулю). Таким образом, осуществляется выравнивание платформы посредством оптимального усилия воздействия гидроцилиндров в соответствующем направлении для обеспечения необходимого наклона платформы (со стороны возвышения рельса — втягивание штока, с другой стороны — выдвигание штока гидроцилиндра). При этом в одном цилиндре заполняется поршневая полость, в другом — штоковая. После прохождения переходной кривой система переводит гидрораспределители в нейтральное положение, тем самым запирая гидросистему механизма наклона платформы; кран движется в кривой с удерживанием платформы в горизонтальном положении. Предложенная система стабилизации позволила достигнуть угла наклона платформы относительно ходовой тележки до 6° в криволинейных участках пути (рис. 6, 7); при этом максимальный обеспечиваемый системой угол наклона — 8° .

При выходе из кривой подаются сигналы управления гидрораспределителям и система обрабатывает в обратном порядке. Силовой гидроцилиндр выполняет роль гасителя вертикальных колебаний платформы, обеспечивая плавность хода.

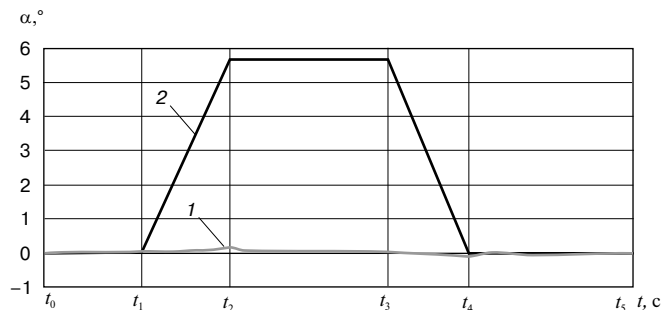


Рис. 7. Изменение угла наклона платформы крана α относительно железнодорожного пути в поперечном направлении:

1 — кран с системой стабилизации;
2 — кран без системы стабилизации

Fig. 7. Changing the angle of inclination of the platform α of the crane relative to the railway track in the transverse direction:

1 — crane with a stabilization system; 2 — crane without stabilization system

Предложенная система, осуществляющая выравнивание платформы, может работать как в следящем режиме в процессе всего движения и работы железнодорожного крана, так и в периодическом режиме. Выбор режима работы возлагается на обслуживающий персонал грузоподъемного крана.

К достоинствам разработанной системы относятся: отсутствие необходимости учета конструктивных параметров устройства, кинематических и жесткостных параметров технического средства; отсутствие требования заранее известных данных о кривизне кривой, координатах начала и конца криволинейных участков пути при движении крана, а применение нечеткой логики позволяет оптимизировать систему «изменение ПЦМ железнодорожного крана — управляющее воздействие».

Выводы. В среде Simulink MATLAB при помощи библиотек SimMechanics, SimHydraulics, Fuzzy Logic Toolbox был проведен анализ предложенного

технического решения: системы стабилизации платформы железнодорожного крана при движении в кривых участках железнодорожного пути, основанной на алгоритмах нечеткой логики.

Полученные результаты математического моделирования модернизированной технической системы позволили исследовать предложенную систему с целью корректировки, настройки и оптимизации ее параметров, а также оценки влияния ее работы на характеристики подвижного состава.

Разработанная система стабилизации платформы железнодорожного грузоподъемного крана позволяет:

- четко позиционировать платформу в горизонтальном положении в кривых участках пути, что обеспечивает снижение опасности, а в некоторых случаях исключает сход колесных пар крана с рельсовой колеи при его смещении в процессе вывешивания на выносных опорах и непопадание колесной пары ходовой тележки на рельсовую колею после выполнения работ и снятия крана с выносных опор;

- выполнять при необходимости погрузо-разгрузочные работы без выносных опор в кривых участках пути, в том числе в условиях ограниченного пространства (например, в тоннеле).

Нужно отметить, что в данном исследовании рассматривается движение железнодорожного крана на относительно небольших скоростях (до 50 км/ч) и, значит, относительно небольших значениях центростремительного ускорения при движении в кривых, т. е. при движении железнодорожного крана непосредственно в месте выполнения погрузо-разгрузочных работ. Следовательно, для скоростного и высокоскоростного пассажирского и грузового подвижного состава (со скоростями свыше 140 и 250 км/ч) применение аналогичной системы с некоторыми доработками требует дополнительных исследований, особенно в области влияния на здоровье и комфорт пассажиров.

Алгоритм интеграции пакета Fuzzy Logic Toolbox, библиотек SimMechanics и SimHydraulics пакета Simulink на базе программы MATLAB и программного комплекса САПР SolidWorks, позволяющий получить единую среду моделирования, применим к широкому диапазону сложных технических систем. При этом исследуемая техническая система представляет собой совокупность взаимосвязанных подсистем, каждая из которых рассматривается с учетом влияния одной подсистемы на другую. Такой подход значительно повышает качество проектирования, позволяя исследовать и анализировать динамику работы разрабатываемых систем.

Для цитирования: Потахов Д. А. Система стабилизации платформы железнодорожного грузоподъемного крана // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 3. С. 160–167. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-160-167>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила по охране труда для работников восстановительных поездов ОАО «РЖД»: ПОТ РЖД-4100612-ЦРБ-090-2016 [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 9 ноября 2016 г. № 2247р. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjzhenie-oao-rzhd-ot-09112016-n-2247r-ob-utverzhenii> (дата обращения: 20.03.2021 г.).
2. Исследование уровня комфорта пассажиров в поездах с принудительным наклоном кузова в кривых методами математического моделирования / Д. Я. Антипин [и др.] // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 3–8.
3. Persson R. Tilting trains. Description and analysis of the present situation. Report / KTH Railway Vehicles. Stockholm, 2007. 80 p.
4. Liu-Henke X., Luckel J., Jaker K-P. An active suspension/tilt system for a mechatronic railway carriage // Control Engineering Practice. 2002. Vol. 10. Issue 9. P. 991–998.
5. Программа контроля и управления грузовой и собственной устойчивостью транспортного средства: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018616841 / Я. С. Ватулин [и др.]. № 2018614084; дата поступления 25 апреля 2018 г.; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 7 июня 2018 г.
6. Xue D., Chen Y. System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 488 p.
7. Russell K., Shen Q., Sodhi R. S. Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems: Implementation in MATLAB and SimMechanics. Boca Raton, FL: CRC Press, Inc., 2016. 443 p.
8. SimMechanics: User's Guide: Version 2.7 / MathWorks, Inc. Natick, MA, 2007. 840 p.
9. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с.
10. Kurowski P. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2017. SDC Publications (USA), 2017. 600 p.
11. SimHydraulics: User's Guide: Version 1.16 / MathWorks, Inc. Natick, MA, 2015. 688 p.
12. Васильченко В. А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: справочник. М.: Машиностроение, 1983. 301 с.
13. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов: учеб. пособие для вузов. В 2-х т. Т. 1. 13-е изд. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 432 с.
14. Ватулин Я. С. Автоматизированный комплекс управления устойчивостью мобильных грузоподъемных средств // Известия Тульского государственного университета. Серия: Подъемно-транспортные машины / под ред. П. А. Сорокина. Тула: Изд-во ТулГУ, 2001. С. 146–152.
15. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
16. Siddique N. Computational Intelligence: Synergies of Fuzzy Logic, Neural Networks and Evolutionary Computing. Wiley, Inc., 2013. 517 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОТАХОВ Денис Александрович, аспирант, кафедра «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины», ФГБОУ ВО «ПГУПС»

Статья поступила в редакцию 28.03.2021 г., принята к публикации 29.04.2021 г.

Railway crane platform stabilization system

Д. А. ПОТАХОВ

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I” (FGBOU VO “PGUPS”), St. Petersburg, 190031, Russia

Abstract. When operating a railway crane in curved sections of the track, derailment of wheelsets of the crane bogies from the rail track when it is displaced during hanging on the outriggers, wheelset of the bogie missing the rail track after the work has been completed or the crane has been down from the outriggers, which significantly affects performance of loading and unloading operations. One of the reasons for the occurrence of such dangerous situations is the not strictly horizontal position of the non-rotating platform of the railway crane.

Railway cranes are part of recovery trains designed to eliminate the consequences of rolling stock derailments. A priority for recovery trains is to reduce the time it takes to eliminate the consequences of traffic accidents, which can be achieved through the use of new or improved devices or methods.

The article describes a system of automatic stabilization (leveling) of the platform of a railway crane (for example, EDK 500/1 crane type) when it moves in curved sections of the track (the motion of a railway crane at relatively low speeds (up to 50 km/h) is considered).

In order to study the modernized technical system (a crane equipped with an automatic platform stabilization system), its mathematical simulation is carried out. At the initial stage, a solid-state digital model of a railway crane in combination with a section of a railway track is created in the SolidWorks computer-aided design system; developed solid model is translated into the SimMechanics MATLAB environment. Further, in order to improve the adequacy of modeling, the developed dynamic model is being finalized by integrating MATLAB program libraries (SimMechanics, SimHydraulics, Fuzzy Logic Toolbox, etc.) to take into account the interaction of elements of different physical nature. Results of modeling modernized technical system are presented, which confirm the advisability of using the stabilization system on railway cranes when passing curved track sections.

Keywords: railway crane; stabilization system; dynamic modeling; SimMechanics; SimHydraulics; Fuzzy Logic Toolbox

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-160-167>

REFERENCES

1. *Occupational Safety Rules for employees of recovery trains of the JSC “Russian Railways”*: POT RZD-4100612-TsRB-090-2016. Approved by order of the JSC “Russian Railways” dated November 9, 2016 No. 2247r. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-09112016-n-2247r-ob-utverzhenii> (retrieved on 20.03.2021) (in Russ.).
2. Antipin D. Ya., Vaulin P. V., Lapshin V. F., Mitrakov A. S. *Issledovanie urovnya komforta passazhirov v poezdakh s prinuditel'nykh naklonom kuzova v krivykh metodami matematicheskogo modelirovaniya* [Investigation of the comfort level of passengers in trains with forced body tilt in curves by methods of mathematical modeling]. *Transport Urala*, 2017, no. 3 (54), pp. 3–8.
3. Persson R. *Tilting trains. Description and analysis of the present situation*. Report. Stockholm, KTH Railway Vehicles Publ., 2007, 80 p.

■ E-mail: potakhovd@mail.ru (D. A. Potakhov)

4. Liu-Henke X., Luckel J., Jaker K.-P. *An active suspension/tilt system for a mechatronic railway carriage*. *Control Engineering Practice*, 2002, Vol. 10, Issue 9, pp. 991–998.

5. Vatulina Ya. S., Vatulina E. Ya., Polyakov B. O., Potakhov D. A., Potakhov E. A. *Programma kontrolya i upravleniya gruzovoy i sobstvennoy ustoychivost'yu transportnogo sredstva* [Program of control and management of the freight and its own stability of the vehicle]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2018616841* [Certificate of state registration of the computer program 2018616841]. No. 2018614084; registered in the Register of Computer Programs on June 7, 2018 (in Russ.).

6. Xue D., Chen Y. *System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink*. John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2013, 488 p.

7. Russell K., Shen Q., Sodhi R. S. *Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems: Implementation in MATLAB and SimMechanics*. Boca Raton, FL, CRC Press, Inc. Publ., 2016, 443 p.

8. *SimMechanics: User's Guide: Version 2.7*. Natick, MA, MathWorks, Inc. Publ., 2007, 840 p.

9. Alyamovskiy A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations]. Moscow, DMK Press Publ., 2015, 562 p.

10. Kurowski P. *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2017*. SDC Publications (USA), 2017. 600 p.

11. *SimHydraulics: User's Guide: Version 1.16*. Natick, MA, MathWorks, Inc. Publ., 2015, 688 p.

12. Vasil'chenko V. A. *Gidravlicheskie oborudovanie mobil'nykh mashin. Spravochnik* [Hydraulic equipment of mobile machines. Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 301 p.

13. Piskunov N. S. *Differentsial'noe i integral'noe ischisleniya dlya vtuzov* [Differential and integral calculus for technical colleges]. Ucheb. posobie dlya vtuzov. V 2-kh t. T. 1. 13-e izd. [Textbook for technical colleges. In 2 Vols. Vol. 1. 13th Ed.]. Moscow, Nauka Publ. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury [Main edition of physical and mathematical literature], 1985, 432 p.

14. Vatulina Ya. S. *Avtomatizirovanny kompleks upravleniya ustoychivost'yu mobil'nykh gruzopod'emnykh sredstv* [Automated complex of stability control of mobile lifting equipment]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pod'emno-transportnye mashiny* [Bulletin of the Tula State University. Series: Handling and lifting machines]. Tula, TulGU Publ., 2001, pp. 146–152.

15. Leonenkov A. V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005, 736 p.

16. Siddique N. *Computational Intelligence: Synergies of Fuzzy Logic, Neural Networks and Evolutionary Computing*. Wiley, Inc. Publ., 2013, 517 p.

ABOUT THE AUTHOR

Denis A. POTAKHOV,

Post-graduate, Department of “Handling and lifting, track and construction machines”, FGBOU VO “PGUPS”

Received 28.03.2021

Accepted 29.04.2021

For citation: Potakhov D. A. Railway crane platform stabilization system // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (3): 160–167 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-160-167>.