

УДК 621.874.04

Поликарпов Ю. В., Диденко Ю. Н.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО КРАНА ПО РЕЛЬСОВОМУ ПУТИ

Одним из наиболее часто подвергающихся ремонтам механизмов кранов, передвигающихся по рельсовому пути, является механизм передвижения. Основная причина этого явления – интенсивный износ колесных реборд и рельсов в результате их силового взаимодействия на значительной части пути крана. Этим же, в значительной степени, обусловлено появление дефектов в элементах пролетных строений мостовых кранов [1]. Проблема возникла еще в начале прошлого столетия, но до настоящего времени не получила должного решения, хотя первоисточник явления известен – перекосы ходовых колес механизма передвижения крана. Одна из причин такого положения – неопределенность связи между перекосами колес и износом реборд. Вследствие этого невозможно с достаточным обоснованием определить параметры силового взаимодействия реборд с рельсами и наметить действенные пути решения проблемы.

Анализ известных нам публикаций показывает, что к текущему моменту сложилось два различных подхода к описанию процесса движения опорных грузоподъемных кранов на цилиндрических колесах по рельсовому пути.

Первый из них, берущий свое начало в 60-х годах прошлого столетия и разделяемый многими исследователями прошлого, и отчасти текущего столетия, можно назвать динамическим. Последней работой, развивающей этот подход, является докторская диссертация доцента МГТУ Лобова Н. А. «Разработка основ динамики передвижения кранов по рельсовому пути и методов повышения ресурса работы крановой системы» [2]. Сравнение оглавлений этой работы и работы [3], вышедшей двумя годами ранее, показывает практически полное совпадение наименований разделов и подразделов, а также приложений. Это дает основания считать основное содержание этих работ идентичным. Различия, если они есть, несущественны. Основной тезис работ в рассматриваемом плане: «Установившееся прямолинейное движение крана есть динамический процесс. Динамические явления приводят к тому, что движение крана становится неустойчивым».

Так, например, в предисловии к работе [2] содержится следующий текст: « При передвижении крана по рельсовому пути возникает ряд динамических процессов, существенно влияющих на работоспособность как собственно крана, так и подкранового рельсового пути ... К таким процессам, в частности, относятся: ...; поперечные (относительно рельсового пути) и вращательные движения крана в горизонтальной плоскости в пределах зазоров между ребордами колес и рельсами; ...».

Второй подход – чисто кинематический. В нем не принимаются во внимание ни инерционные силы, ни упругость элементов конструкции, а предпринята попытка найти траекторию свободного движения крана как результат действия поперечных и продольных сил упругого скольжения колес относительно рельсов. О существовании этих сил было известно давно [3]. Они – возникают при передаче сил и моментов через фрикционный контакт тел. В рассматриваемом плане упругое скольжение и силы – следствие погрешностей установки колес, в результате которых плоскости их качения не строго параллельны одна другой. Под свободным движением понимается установившееся движение крана по инерции без касания колесных реборд с рельсами и без учета сил сопротивления движению. Первая публикация с такой постановкой вопроса датирована 2004 г [4]. В этой, и следующей [5] публикациях показано, что при принятых допущениях траекторией движения крана будет окружность, а также определены радиусы кривизны траектории для четырехколесных и многоколесных

кранов с общим и раздельным приводом в функции углов перекоса колес и геометрических параметров крана для кранов с общим и раздельным приводом. В последующих публикациях [6–9] этот подход получил развитие, в частности, была учтена податливость общего вала, оценена возможность управления движением крана с помощью приводных двигателей, рассмотрено движение крана на участке контакта реборды одного из колес с рельсом и др. Теоретические положения прошли проверку на экспериментальных данных, полученных другими исследователями [8].

На основе нового представления о характере движения кранов на цилиндрических колесах были разработаны модели движения кранов на конических колесах [9].

Очевидно, что от выбора того или другого подхода к описанию движения крана будут зависеть результаты определения поперечных усилий, возникающих при взаимодействии колесных реборд с рельсами. Поэтому необходимо предварительно принять обоснованное решение о том, какой из подходов может служить надежной основой дальнейшей работы.

Целью данной работы является обоснование выбора модели, описывающей движение крана на цилиндрических колесах, для исследования параметров силового взаимодействия колес с рельсами.

При сопоставлении этих двух моделей примем за основу содержательную классификацию моделей по Р. Пайерлсу [10].

Очевидно, что по таким показателям как детальность описания явления, сложность привлеченного математического аппарата, продолжительность существования, число публикаций, степень поддержки научным сообществом, динамическая модель должна быть отнесена к наиболее правдоподобному первому типу – «гипотеза» (такое могло бы быть). Однако, следует обратить внимание на характеристику статуса моделей этого типа: «Если модель первого типа построена, то это означает, что она временно признаётся за истину и можно сконцентрироваться на других проблемах. Однако это не может быть точкой в исследованиях, а только временной паузой: статус модели первого типа может быть только временным».

Кинематическая модель может быть отнесена к моделям четвертого типа – «упрощение» (опустим для ясности некоторые детали). В примере с гармоническим осциллятором [Там же] дана следующая характеристика моделей такого типа: «при уточнении модели сложность её математического исследования может существенно возрасти и сделать модель фактически бесполезной. Зачастую более простая модель позволяет лучше и глубже исследовать реальную систему, чем более сложная (и, формально, «более правильная»)».

Из вышеизложенного следует, что с общей точки зрения переход к более простой модели не противоречит логике познания, которая, тем не менее, предполагает последовательное усложнение простых моделей до тех пор, пока не будет достигнута достаточная степень приближения к реальной системе.

Нет сомнения в том, что рассматриваемая классификация ранжирует модели, упорядочивая их по убыванию правдоподобия и сложности. Поэтому в процессе решения задачи естественным является последовательное движение от простых моделей низших типов к все более сложным моделям. Для простоты рассмотрим четырехколесный кран с раздельным приводом.

Решение задачи о движении крана, на наш взгляд, имеет смысл начать с модели восьмого типа – мысленный эксперимент «демонстрация возможности». Смысл его в том, чтобы показать возможность преобразования набора неупорядоченных перекосов колес в упорядоченный набор, что позволит далее перейти к модели более высокого уровня.

Процедура измерения перекосов колес определена стандартом [11]. В качестве базы измерений предписывается принять «линию, проходящую через центры колес». В связи со

сложностью материализации этой линии на практике часто принимают другие базы, например, направление рельсового пути, торцевую плоскость одного из колес, и др. Естественно, что при изменении базы изменяются результаты измерений.

Предположим, в результате измерений углов перекосов относительно некоторой базы были получены значения β_i , где i – номер колеса. В общем случае

$$\sum \beta_i = a ,$$

где a – некоторое число, не равное нулю. Очевидно, что если направление базы измерений повернуть на угол, равный $a/4$, то каждый из углов β_i изменится на эту величину. Тогда, обозначив новые значения углов β'_i , можем записать:

$$\sum \beta'_i = 0 . \quad (1)$$

Назовем полученные величины приведенными углами перекосов, а направление (1) – приведенной базой. Перенеся любую пару углов β' в правую сторону, получим:

$$\beta'_1 + \beta'_2 = -(\beta'_3 + \beta'_4) . \quad (2)$$

Поскольку в выборе слагаемых для переноса в правую сторону мы не ограничены, то можем считать, что β'_1 и β'_2 это перекосы колес одной оси, а β'_3 и β'_4 – другой. К данному виду можно привести результаты измерения углов перекосов относительно любой базы. Однако, на наш взгляд, наиболее целесообразно в качестве базы принять направление рельсового пути. Если кран не имеет перекосов колес и установлен вдоль направления рельсового пути, то для него $\beta_i = 0$ и $\sum \beta_i = 0$. Тогда при наличии перекосов колес, т. е. если $\beta_i \neq 0$, выполнение равенства (1) можно считать условием установки крана без перекоса относительно рельсового пути, а величину $a/4$ – углом перекоса крана относительно этого направления.

В качестве величины, характеризующей перекося колес крана, β_K , на наш взгляд, целесообразно принять полусумму приведенных углов перекоса колес одной оси, т. е.:

$$\beta_K = (\beta'_{1(3)} + \beta'_{2(4)}) / 2 . \quad (3)$$

Очевидно, что результат данного выражения не зависит от направления принятой для измерений базы.

На этом построение модели восьмого типа можно закончить. Полученный результат можно сформулировать следующим образом: «На основе результатов измерения перекосов колес относительно любой базы путем несложных вычислений можно найти базовое направление, относительно которого сумма углов перекоса колес одной оси равна сумме углов перекоса колес другой оси, взятых с обратным знаком».

Аналогии рассмотренной выше ситуации с перекосами колес (2) довольно многочисленны – это любое из двух и четырехколесных транспортных средств, в которых изменение направления движения осуществляется за счет поворота пары передних или задних колес. В этих случаях аналогия станет очевидной после выполнения все того же преобразования (1), (2). Более полная аналогия – краны, движущиеся по круговым траекториям. К ним относятся кольцевой, радиальный, хордовый, поворотный краны. При существенных конструктивных различиях их общей особенностью является то, что оси их колес ориентированы по радиусу кольцевой рабочей площадки. Схема такого крана приведена на рис. 1. Схема обычного мостового крана, колеса которого не строго параллельны одно другому, в системе координат, ось ОХ которой параллельна линии, соответствующей условию (2), приведена на рис. 2.

Можно было бы говорить о полной аналогии между схемами рис. 1 и рис. 2 в рассматриваемом аспекте, если бы не два отличия. Первое отличие состоит в том, что на схеме рис. 2 оси колес не лежат в одной радиальной плоскости. Второе отличие – в том, что на этой же схеме, рис. 2, углы наклона колес одной оси крана по отношению к оси OX не равны между собой, т. е. $\beta'_1 \neq \beta'_2$.

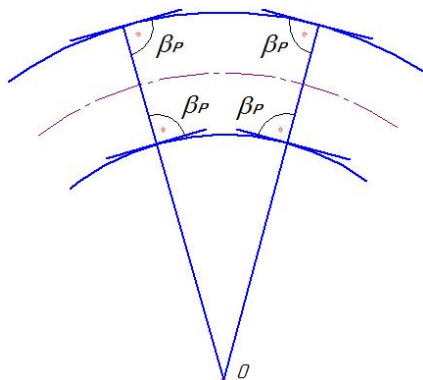


Рис. 1. Схема установки колес кольцевого крана

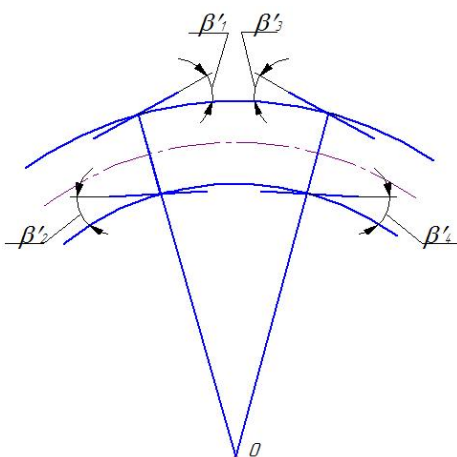


Рис. 2. Приведенная схема установки колес мостового крана

Из геометрических соотношений рис. 1 можем записать:

$$R_p = \frac{B_p}{2 \sin \beta_p}, \tag{4}$$

где R_p , B_p , β_p – радиус траектории движения радиального крана по оси пролета, его база, угол наклона осей колес к оси OX , соответственно.

В соответствии со стандартом [11] допускаемые перекосы колес измеряются десятичными долями радиана. Если предположить, что радиус кривизны траектории крана по схеме рис. 2 можно приближенно вычислить по формуле (4), то его величина составит десятки километров. С учетом того, что пролет крана составляет величину, измеряемую метрами, становится очевидным, что отличия в расположении колес относительно радиальной плоскости соизмеримы с допускаемыми отклонениями их расположения по стандарту, т. е. приводят к весьма небольшим погрешностям. С другой стороны, если в качестве угла наклона каждого из колес принять полусумму приведенных углов перекоса колес одной оси (3), то схема рис. 2 приводится к схеме рис. 1, т. е. «в среднем» эти схемы равноценны.

Более того, при равенстве и постоянстве условий на контакте каждого из колес с рельсом можно утверждать, что траекторией будет именно окружность. Основание для этого утверждения – постоянство значений сил упругого скольжения и изменение направления их действия вместе с поворотом крана. В таком случае конечное положение крана при перемещении на сколь угодно малое расстояние повторяет исходное, повернутое на некоторый угол.

Таким образом, характер аналогии достаточен для того, чтобы считать, что:

1. Кран, плоскости качения колес которого наклонены по отношению друг к другу под углами, составляющими тысячные и десятитысячные доли радиана, на участке свободного движения перемещается по траектории близкой к круговой.

2. Радиус кривизны траектории геометрического центра такого крана приближенно можно вычислить по формуле (4), подставив в нее в качестве β_p полусумму приведенных перекосов колес любой оси.

Проведенный анализ подтверждает достаточно высокую степень правдоподобия кинематической модели. Что касается динамической модели, то, принятый «по умолчанию», постулат об исходном прямолинейном движении крана следует считать ошибочным. Следовательно, нет необходимости ставить вопрос о поиске «условий устойчивого прямолинейного движения крана».

На данном этапе анализа вопрос о целесообразности учета динамических явлений при вхождении реборд в контакт с рельсами можно оставить открытым.

ВЫВОДЫ

Рассмотрев два различных подхода к описанию процесса движения опорных грузоподъемных кранов на цилиндрических колесах по рельсовому пути, а именно, кинематическая и динамическая модель, пришли к выводу, что параметры силового взаимодействия реборд крановых колес с рельсами следует определять на основе кинематической модели движения крана по рельсовому пути.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лубенец С. В. Причины возникновения дефектов концевых балок мостовых кранов / С. В. Лубенец // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 2 (23). – С. 92–95.
2. Лобов Н. А. Разработка основ динамики передвижения кранов по рельсовому пути и методов повышения ресурса работы крановой системы : дис... д-ра техн. наук: 05.05.04 / Н. А. Лобов. – Москва, 2005. – 294 с.
3. Лобов Н. А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути / Н. А. Лобов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 232 с.
4. Поликарпов Ю. В. Кинематика движения четырехколесной ходовой тележки грузоподъемного крана / Ю. В. Поликарпов // Подъемно-транспортная техника. – 2003. – № 2. – С. 78–82.
5. Поликарпов Ю. В. Кинематика движения многоколесных ходовых тележек грузоподъемных кранов / Ю. В. Поликарпов // Подъемно-транспортная техника. – 2005. – № 1. – С. 88–95.
6. Поликарпов Ю. В. Установившееся движение грузоподъемного крана на цилиндрических колесах с отдельным приводом по рельсовому пути / Ю. В. Поликарпов // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – № 3 (9). – С. 202–207.
7. Поликарпов Ю. В. Учет влияния упругости вала на движение четырехколесного мостового крана с общим приводом [Электронный ресурс] / Ю. В. Поликарпов // Научный вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – 2010. – №1(6Е). – С. 189–197. – Режим доступа: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/vestnik/1/article/10PJWCD.pdf>.
8. Поликарпов Ю. В. Анализ экспериментальных данных о движении грузоподъемных кранов на цилиндрических колесах с отдельным приводом с позиций кинематики / Ю. В. Поликарпов // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 3 (20). – С. 208–213.
9. Поликарпов Ю. В. Закон движения грузоподъемного крана на конических колесах / Ю. В. Поликарпов // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 226–230.
10. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.wikipedia.org/wiki/математическая_модель.
11. ГОСТ 27584-88. Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия. Введ. 01.01.90. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 24 с.

Статья поступила в редакцию 26.10.2011 г.