

УДК 621.874

Г. А. Федяева, Д. В. Кочевин, В.П. Лозбинев, Ф.Ю. Лозбинев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОСТОВОГО КРАНА<sup>1</sup>

Представлены методика и результаты моделирования динамических процессов управляемого движения мостового крана с учетом проскальзывания колес, перераспределения вертикальных нагрузок, горизонтальной неровности рельсов и других особенностей механической подсистемы на основе совмещения программных комплексов Matlab/Simulink и «Универсальный механизм».

Ключевые слова: электропривод, программные комплексы, УМ, Matlab/Simulink, мостовой кран, моделирование динамики, система управления, прогнозирование динамических процессов.

При разработке новых мостовых кранов и модернизации существующих важную роль играет анализ динамических процессов в механической части с целью снижения возникающих нагрузок средствами управления и продления срока службы. В настоящее время такие исследования выполняются, как правило, на упрощенных моделях [1; 2], что позволяет приближенно учесть наиболее существенные явления. Однако для более точного прогнозирования динамических процессов в сложных электромеханических системах на стадии проектирования необходимо совершенствование методологии моделирования и уточненное представление механической подсистемы. С этой целью для создания модели механической части целесообразно использовать специализированные программные комплексы, позволяющие выполнить моделирование с высокой степенью детализации и визуализации.

Разработана модель мостового крана (рис. 1) в программном комплексе (ПК) «Универсальный механизм» (УМ) [3], приняты следующие основные допущения:

- механическая часть крана представлена как система твердых тел (кабина, балансирующая тележка, грузовая тележка, элементы пролетной балки моста и т. д.), соединенных упругодиссипативными связями;
- связи между телами невесомы.

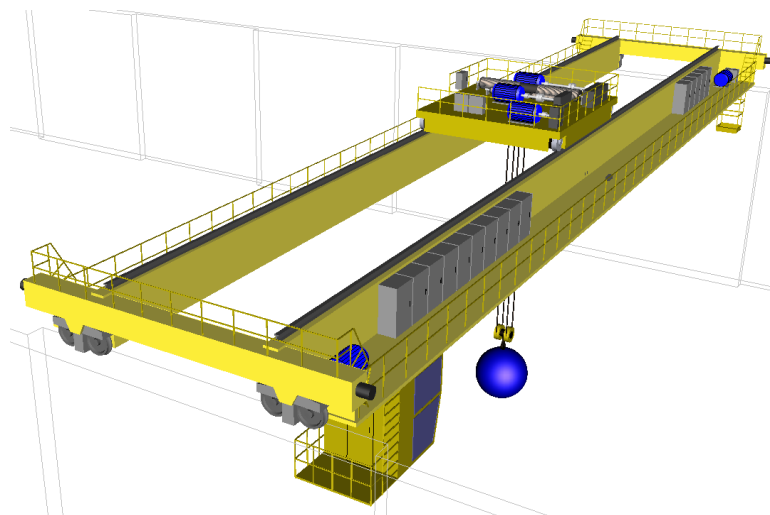


Рис. 1. Модель мостового крана в УМ

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (НИР № 1633 (06/62) «Прогнозирование динамических процессов в электромеханотронных системах»).

Все тела модели соединяются друг с другом с помощью различного рода элементов, которые, в свою очередь, обуславливают возможные перемещения тел. Так, к раме крана, имеющей все шесть степеней свободы, неподвижно крепятся кабина и площадка для обслуживания цеховых троллеев. Балансирные тележки соединены с рамой с помощью вращательных шарниров с одной степенью свободы. Таким же образом с балансиром соединены крановые колеса. Грузовая тележка имеет шесть степеней свободы и контактирует с пролетными балками. Груз представляет собой физический маятник, который может совершать пространственные колебания относительно точки крепления подвеса к тележке. Всего модель с учетом упругости пролетных балок имеет 104 степени свободы.

Модель пути принята упруговязкой. Инерционные свойства пути в вертикальной плоскости учитываются в виде приведенной к колесам массы, в горизонтальной плоскости путь считается неинерционным. Данная модель пути широко применяется при оценке динамических качеств рельсового транспорта, когда не ставится задача определения динамических нагрузок элементов верхнего строения пути [3], и ее можно отнести к встроенным модулям UM. Кроме того, для всех моделей рельсового транспорта в UM предусмотрено определение дополнительных параметров. Для этого имеются следующие средства: дополнительный модуль расчёта сил сцепления и параметров путевой структуры; процедуры генерирования случайных неровностей по заданным спектральным плотностям; визуальная среда для задания профилей колёс и рельсов, потенциальных коэффициентов сцепления на соответствующих участках пути, профиля пути.

На рис. 2 в качестве примера представлено изображение кранового колеса К2Р-710×150 и подкранового рельса КР120 в редакторе профилей UM (значения по координатным осям выражены в миллиметрах). По рисунку видно, что для данных типов колес и рельсов максимальное поперечное смещение крана в любую сторону составляет примерно 28 мм относительно начального положения, когда кран расположен симметрично относительно рельсов.

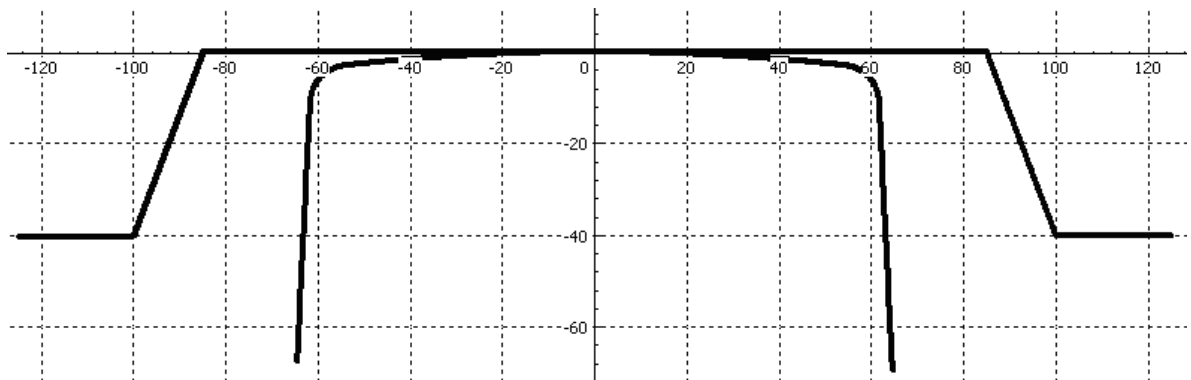


Рис. 2. Крановое колесо и рельс в редакторе профилей UM

Силы тяги и торможения реализуются как касательные силы в контакте между колесом и рельсом. В ПК UM используются различные алгоритмы расчета касательных сил в контакте «колесо-рельс», в том числе с учетом положения рабочей точки на падающем участке характеристики сцепления в случае буксования или юза [3].

Адекватность модели мостового крана проверена путем сравнения результатов моделирования отдельных режимов движения мостового крана грузоподъемностью 70 т с аналитическими расчетами. Например, сравнивались величины вертикальных нагрузок на колеса крана как в статическом режиме, так и при движении крана с колебаниями груза вдоль оси пути. Максимальная погрешность не превышает 5 %.

Разработанная модель позволяет более детально анализировать различные проблемные варианты движения крана. В частности, одной из основных проблем, возникающих

при эксплуатации мостовых кранов, является перекос фермы моста относительно подкрановых путей, неизбежно возникающий в процессе работы крана. Перекос, являясь, по сути, поворотом крана относительно вертикальной оси, сопровождается обычно поперечным смещением и обусловлен следующими основными факторами: 1) разбросом параметров оборудования (электродвигателей, передаточных механизмов, пускорегулирующей аппаратуры); 2) технологической разницей между диаметрами крановых колес; 3) переменным характером взаимодействия колес с подкрановыми рельсами; 4) несимметричной нагрузкой на опоры крана; 5) колебаниями груза. Перекос и поперечное смещение моста относительно направления движения, в свою очередь, вызывают контакт реборд крановых колес с рельсами.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты моделирования одного из вариантов движения крана без использования специальных мер коррекции перекоса. В этом случае в момент времени  $t \approx 29$  с происходит контакт реборд колес первой левой балансирной тележки с рельсами. На рис. 3а приведены возникающие при этом боковые контактные силы, на рис. 3б – анимация контактных сил в момент соприкосновения реборд с рельсами (вверх направлены нормальные вертикальные реакции всех колес, вправо – нормальные боковые реакции первого и второго колес в точке контакта реборд с рельсами  $F_{k1}$  и  $F_{k2}$  соответственно).

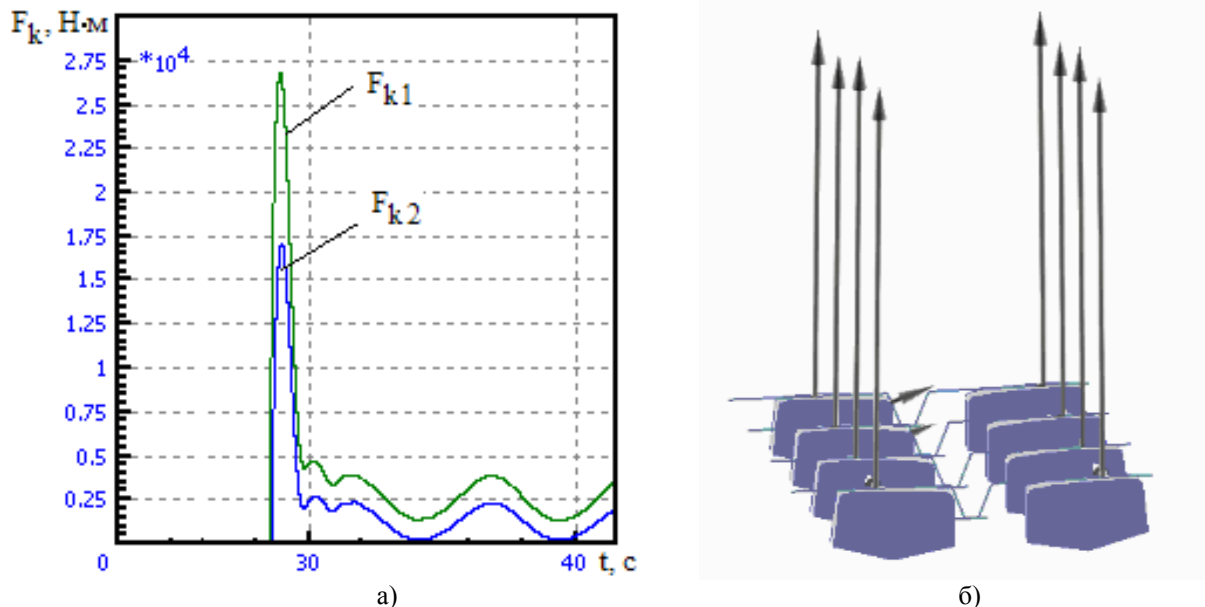


Рис. 3. Результаты моделирования движения крана без коррекции перекоса: а - нормальные боковые реакции колес в точке контакта реборд с рельсами; б - анимация контактных сил

Реборды, воспринимая нагрузку, ограничивают дальнейшее смещение крана, предотвращая сход крана с рельсов. При этом в точках контакта возникает процесс трения скольжения, что способствует сокращению срока службы как крановых колес, вследствие интенсивного износа реборд, так и подкрановых путей.

Разработана микропроцессорная система управления электропривода передвижения мостового крана, обеспечивающая непрерывную коррекцию положения моста относительно рельсов таким образом, чтобы исключить контакт реборд крановых колес с рельсами во всех режимах работы крана. При этом управление основывается на непосредственной идентификации перекоса и поперечного смещения с помощью четырех бесконтактных датчиков ( $D_1, D_2, D_3, D_4$ ), измеряющих расстояния до рельсов вблизи каждого из крановых колес [4].

Положение крана определяется по дифференциальным значениям, получаемым пу-

тем вычисления разности показаний бесконтактных датчиков, измеряющих расстояния от мест их установки до рельсов в соответствии с формулами [5]

$$\Delta_{12} = L_{Д1} - L_{Д2},$$

$$\Delta_{34} = L_{Д3} - L_{Д4},$$

где  $\Delta_{12}$ ,  $\Delta_{34}$  – дифференциальные значения;  $L_{Д1}$ ,  $L_{Д2}$ ,  $L_{Д3}$ ,  $L_{Д4}$  – показания датчиков  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  соответственно. Диапазон изменения  $–[0 \dots L_{Дi \max}]$ .

Это позволяет однозначно идентифицировать перекося крана и его поперечное смещение относительно подкрановых путей. В систему управления электродвигателями передвижения крана вводится корректирующее воздействие, позволяющее снизить скорость опережающей опоры крана и тем самым устранить перекося. Значение корректирующего воздействия рассчитывается пропорционально максимальной из дифференциальных величин  $\Delta_{12}$  и  $\Delta_{34}$  по формуле

$$U_k = k \cdot \max(\Delta_{12}; \Delta_{34}),$$

где  $U_k$  – значение корректирующего воздействия;  $k$  – коэффициент пропорциональности, который выбирается в зависимости от уровней сигналов и заданного максимально допустимого смещения крана.

Математическое моделирование электропривода передвижения мостового крана с предложенной системой коррекции перекося выполнено в программном комплексе MatLab/Simulink [6], широко используемом для моделирования автоматизированного электропривода. Разработаны модели электроприводов с двигателями постоянного тока, питаемыми от управляемых выпрямителей, и с асинхронными двигателями, питаемыми от преобразователей частоты.

Для моделирования электромеханических систем в комплексе UM имеются два специальных интерфейса (инструмента) – MatLab Import и CoSimulation [3], позволяющие совмещать модели электрической части, созданные в MatLab/Simulink, и модели механической части, разработанные в UM. Названные интерфейсы реализуют два различных подхода к совмещению моделей: инструмент MatLab Import импортирует в UM модель электрической части, созданную в MatLab/Simulink, и сам процесс моделирования динамики управляемого движения происходит в UM; инструмент CoSimulation экспортирует из UM в MatLab/Simulink модель механической части, которая включается в модель электрической подсистемы в виде стандартного блока – S-функции, и с точки зрения пользователя весь процесс моделирования происходит в MatLab/Simulink. Второй подход снимает ряд ограничений, имеющихся в интерфейсе MatLab Import. В частности, можно использовать модели полупроводниковых преобразователей из пакета силовой электроники MatLab/Simulink и дискретные блоки.

Для создания комплексных электромеханических моделей мостового крана использован интерфейс CoSimulation. Выполнено исследование на моделях работы систем управления передвижением мостового крана с коррекцией перекося и поперечного смещения при реализации их на базе двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей при учете горизонтальной и вертикальной неровностей рельсов, положения тележки, несимметрии конструкции крана, проскальзывания колес, раскачивания груза.

На рис. 4 представлены результаты моделирования системы коррекции перекося с учетом кривизны крановых рельсов, которая, согласно требованиям, не должна превышать 2 мм на 1 м длины в горизонтальной и вертикальной плоскостях [7]. ПК UM позволяет задавать такого рода неровности. В данном случае введена детерминированная гармоническая неровность рельсового пути вида  $2(1 - \cos x)$  с длиной волны 1 м.

Результаты приведены для наиболее простой разомкнутой системы управления с двигателями постоянного тока, в которой для устранения перекося и поперечного смещения осуществляется коррекция питающего двигателя напряжения. На рис. 4а для сравнения показаны значения перекося крана при включенной и отключенной системе коррек-

ции. При наличии корректирующих сигналов (рис. 4б) перекося практически сведен к нулю. Из графиков видно, что моделируемая система обрабатывает заданную величину неровности 2 мм.

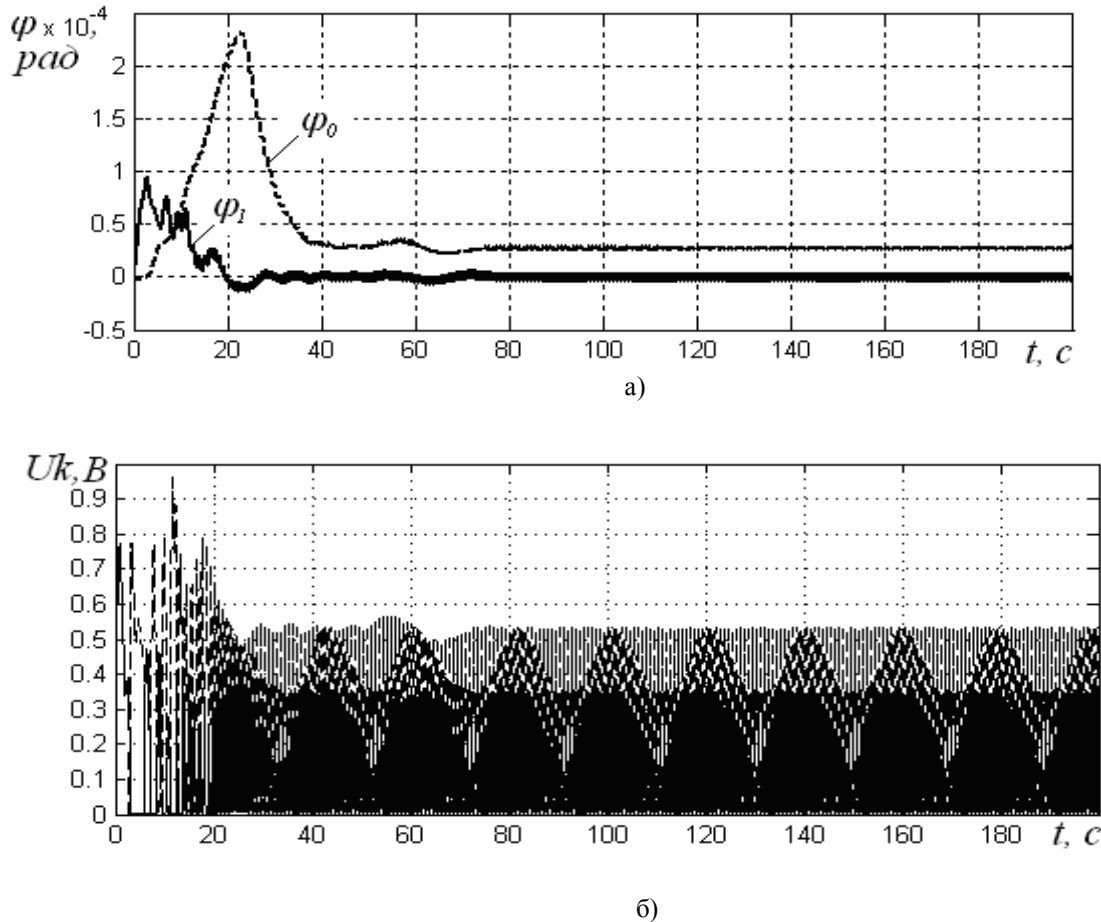


Рис. 4. Результаты моделирования движения крана с учетом горизонтальной волнообразной неровности рельсов: а - перекося крана ( $\varphi_0$  – без коррекции,  $\varphi_1$  – с коррекцией); б - сигналы коррекции

Представленная электромеханическая модель мостового крана позволяет прогнозировать динамические процессы в электрической и механической подсистемах крана и обрабатывать новые алгоритмы управления движением, снижающие нагрузки и износ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теличко, Л.Я. Снижение динамических нагрузок в ферме моста крана при помощи «электромагнитного вала» / Л.Я. Теличко, А.А. Дорофеев, С.Г. Букарев // II Международная выставка-интернет-конференция, посвященная 50-летию ОАО «Орелэнерго» и 10-летию кафедры «Электроснабжение» / Орл. гос. аграр. ун-т. – 2007.
2. Теличко, Л.Я. Анализ причин возникновения сил перекося мостового крана / Л.Я. Теличко, А.А. Дорофеев // Приборы и системы. – 2006. – №7. – С. 35-37.
3. Universalmechanism.com. - Официальный сайт Лаборатории вычислительной механики БГТУ.
4. Способ ограничения перекося мостового крана: пат. РФ на изобретение RU 2405735/ Кочевин Д.В., Федяева Г.А.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. – Опубл. 27.12.13, Бюл. № 36.
5. Кочевин Д. В. Система управления электропривода передвижения мостового крана / Д.В. Кочевин, Г.А. Федяева // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2012. – №3. – С. 4-11.
6. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/ С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008.-368 с.
7. ГОСТ 4121-96. Рельсы крановые. Технические условия. – Введ. 2002-01-07. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2003. – 15 с.

Материал поступил в редколлегию 20.03.14.