

праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ».– 2008. - №4. – С. 156 - 160. 4. *Шелковой А.Н., Приходько О.Ю., Рuzmetov A.P.* Методика адаптации типового вспомогательного технологического перехода к условиям рабочей среды. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ».– 2008. - №4. – С. 156 - 160. 5. *Должиков В.П.* Разработка технологических процессов механо- обработки в мелкосерийном производстве: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 324 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Timofiev Y.V., Ruzmetov AR, Kotsur SA* The analytical approach to the evaluation of the temporal characteristics of the workplace machinist. Visoki tehnologii in mashinobuduvanni: modelyuvannya, optimizatsiya, diagnostika: Zbirnik Naukova Pracuj NTU "KhPI." Vip. 1 (5) - Kharkiv, 2002 p. - P. 370 - 376. 2. *Ruzmetov AR* Determination of the optimal potential of microstructure technology transition. P. 44-49 // News Natsionalno tehnichnoo universitetu "Harkivsky politechnichny institut." Zbirnik Naukova Pracuj. Temachnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU "KhPI" .- 2007. - No1. - P.140 - 144. 3. *Silk AN, Prikhodko OY, Ruzmetov AR* Methods of adapting the model auxiliary process of transition to work environmentP. News Natsionalno tehnichnoo universitetu "Harkivsky politechnichny institut." Zbirnik Naukova Pracuj. Temachnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU "KhPI" .- 2008. - No4. - P. 156 - 160. 4. *Silk A.N. , Prikhodko O.Y., Ruzmetov A.R.* Methods of adapting the model auxiliary process of transition to work environmentP. News Natsionalno tehnichnoo universitetu "Harkivsky politechnichny institut." Zbirnik Naukova Pracuj. Temachnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU "KhPI" .- 2008. - No4. - P. 156 - 160. 5. *Dolzhhikov VP* Development of technological processes of mechanochemical treatment in small-scale production: Textbook. - Tomsk: Izd TPU, 2003. - 324 p.

Поступила (received) 20.10.2014

УДК 621.86

О. В. ГРИГОРОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;
О. В. СТЕПОЧКИНА, асп. НТУ «ХПІ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА С ПЕРЕКОСОМ

В статье рассматриваются особенности программы, предназначенной для исследовательских и инженерных расчетов, объектом которых является кран мостового типа, движущийся с забеганием одной из опор. Обосновывается важность учета параметров приводов механизма передвижения. Предложен подход, позволяющий задавать и контролировать основные параметры элементов привода. Особое внимание уделено обеспечению возможности быстрого перезадавания кинематической схемы в среде MS Excel.

Ключевые слова: перекос крана, краны мостового типа, механизм, математическая модель, MS Excel, кинематическая схема, структура данных.

Постановка проблемы. Движение крана сопровождается поворотами и деформациями конструкции в горизонтальной плоскости. При этом имеет место сложное взаимодействие элементов приводов и металлоконструкции. Также важны процессы, происходящие в зоне контакта колес с рельсами.

© О.В. Григоров, О.В. Степочкина

В данной работе рассматриваются особенности работы приводов механизмов передвижения мостовых кранов. Аспекты моделирования металлоконструкции рассмотрены в публикации [1].

Повышенное внимание к элементам механизмов объясняется, прежде всего, тем, что они достаточно часто являются объектами модернизации. В последнее время модернизации механизмов получили широкое распространение. При этом также обычно обновляется система управления; техническое задание может включать требования изменения скорости и ускорения. Выбор комплектующих производится с учетом накопленного опыта эксплуатации и пожеланий технического персонала.

Оптимальное техническое предложение должно быть обосновано расчетом. Расчет включает проверки при различных состояниях, в том числе в нештатных ситуациях. На стадии бизнес-проекта чаще всего требуется сравнительный анализ приводов разных производителей. Многократные пересчеты существенно повышают трудоемкость проектно-конструкторских работ. Отклонения параметров от оптимума (например, по причине ступенчатости типоразмерных рядов) могут иметь следствием увеличение стоимости, массы, нагрузок и т.д.

При этом корректный учет явлений, сопровождающих движение с перекосом, обычно невозможен. Как следствие, имеются жалобы на работу механизмов кранов с отношением пролета к базе более 4-5. Обычное игнорирование расчета сопротивлений отдельно для каждой из сторон в этом случае приводит к занижению мощности двигателей. Но с другой стороны излишняя мощность также нежелательна, поскольку следствием являются повышенные нагрузки, действующие в горизонтальной плоскости.

Актуальной задачей является уточненное моделирование движения крана с перекосами с возможностью контроля и варьирования параметров приводов. Модель должна представлять собой программу, выполненную в среде MS Excel, которую можно использовать не только как инструмент исследования, но и для инженерных расчетов.

Далее рассматривается подмодель, предназначенная для расчетов механизмов крана.

Анализ последних достижений. К настоящему времени выполнено значительное число исследований процесса движения крана с перекосом. Результаты в обобщенном виде содержатся в ряде отраслевых расчетных норм ([3], [4]). Влияние перекосных нагрузок при выборе элементов механизмов обычно ограничивается учетом коэффициента ребордного трения, величина которого изменяется в пределах от 1,1 до 2. Различие механических характеристик двигателей не принимается во внимание.

Благодаря внедрению частотно регулируемых приводов, появилась возможность создания серийных антиперекосных систем управления, включающих датчики зазора между боковыми поверхностями реборд и рельсами, а также систем синхронизации движения сторон, что во многом снимает вопрос. Однако широкое применение этих решений сдерживается их

высокой стоимостью. Также не снят вопрос корректного выбора мощности двигателей.

Нерешенные части общей проблемы.

Интерес представляет моделирование работы приводов как части общего процесса движения, сопровождающегося нерегулярными толчками, динамическими эффектами, с наличием нескольких устойчивых форм.

Одним из главных требований к модели является приспособленность к инженерным расчетам. Для этого необходимо обеспечить полноту и наглядность представления данных, легкость задания параметров, возможность описания объектов, имеющих разную структуру, например, механизмов с различной кинематической схемой.

В последнем случае имеется сложность принципиального характера, которая при автоматизации вычислений выходит на первый план. Для успешного решения этой задачи требуется управление структурой данных на рабочем листе электронной таблицы с учетом передачи информации таким же образом, как передаются нагрузки в цепочке звеньев механизмов. При этом необходимо учесть направленность этих потоков, а также возможность их распараллеливания.

Основной материал. Известны многочисленные решения, основанные на применении таблиц Excel (вопросы строительной механики, использование метода конечных элементов [6, 7], сопротивление материалов [8], теория механизмов и машин [2], детали машин [8], САПР [5] и т.д.).

Практически, без исключения, ядром таких приложений является код, написанный на языке VBA (роль Excel ограничена вводом-выводом данных). Это необходимо для коммерческих программ, т.к. позволяет защитить код. Однако в результате теряется важное качество электронных таблиц: наглядность расчета и доступность его для анализа. Соответственно, снижается доверие к подобным программам, ограничивается область их использования для решения ответственных задач. Существенным недостатком также является сложность, а чаще невозможность перестройки схемы механизма.

Мы разрабатывали противоположный подход: основные вычисления были выполнены на рабочих листах, а код VBA, практически, был исключен.

Наибольшее внимание уделено структурной составляющей задачи, возможности быстрой перестройки кинематической схемы механизма, а также схемы его нагружения.

Применен следующий принцип. Каждому элементу привода соответствует объект-столбец на рабочем листе кинематической схемы. Набор столбцов, ограниченный слева и справа пустыми столбцами образует модель привода. Модель включает ячейку-переключатель режимов разгона/торможения двигателем и торможения тормозом. Модель в режиме разгона/торможения двигателем – представлена на рис.1. Значения величин на этом рисунке отображены для случая конкретного расчета и далее по тексту не рассматриваются.

Формирование схемы производится перемещением, удалением, дублированием столбцов. На листе имеется резервная коллекция элементов, не учитываемых в расчете. Для этого они отделены от рабочей зоны пустым столбцом.

Используются столбцы-элементы нескольких видов: передающие момент (например, муфта), преобразующие момент (редуктор, открывающая зубчатая пара), преобразующие движение (колесо).

Столбцы, соответствующие активным элементам (двигатель, тормоз) не удаляются. Они, в числе прочего, используются для определения направленности энергетических потоков и связанной с ними направленности приведения физических величин. Ссылки на столбец-тормоз и столбец-двигатель имеют в большей степени логический смысл.

На рис. 2 показаны некоторые влияющие ячейки для отдельного элемента-столбца (часть строк для наглядности скрыта). Как видно, имеются три разновидности связей:

- 1). с ячейками другого листа (некоторые параметры удобно задавать на листе общих исходных данных.);
- 2). с ячейками столбца-двигателя и столбца-тормоза;
- 3). с ячейками соседних столбцов.

Для создания связей последнего типа мы воспользовались техникой специальных ссылок «всегда на соседнюю ячейку». В результате обеспечена целостность схемы при любых манипуляциях со столбцами. Указанный принцип объединения столбцов в общую расчетную зону представляется наиболее наглядным и естественным, поскольку столбцы, как и элементы привода, взаимодействуют только с соседними объектами.

Приведение оборотов (скоростей), угловых ускорений (ускорений) и моментов (сил) выполнено к каждому элементу, что важно при выборе комплектовующих.

Ячейки имеют несколько видов форматирования. Подчеркнуты значения в ячейки, связанные с соседними столбцами; заливкой выделены ячейки, связанные с данными на другом листе. Предусмотрена зона динамических комментариев, поясняющих смысл формул в активной ячейке. Текст комментариев, находящийся в скрытых ячейках, доступен для редактирования. Отдельные строчки с символами ">>>" или "<<<" используются для отображения направленности энергетических потоков и соответственно, последовательности приведения параметров.

Двухмерность рабочего листа является фундаментальным преимуществом электронной таблицы, но так же создает определенные сложности, поскольку любой расчет приобретает геометрический смысл, и требуется повышенное внимание к компоновке ячеек. Важным требованием является максимальная упорядоченность данных, поэтому мы стремились к однородности и регулярности структуры рабочей зоны.

| | A | B | C | F | G | H | I | J | K | L |
|----|---|-------------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| 3 | Параллельные элементы | | | — | — | — | — | — | — | — |
| 6 | Вид движения | | | Rot | Rot | Rot | Rot | Rot | RotTrans | Trans |
| 10 | К-т разъединения/объединения силовых потоков | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | | | | | | | | |
| 12 | Передаточное число; КПД элемента | Схема элементов >>> | | Тормоз Муфта | Двиг. | Муфта Редуктор | Колесо | Юнцевая балка | | |
| 13 | Передаточное число элемента | $U_{эл}$ | | 1 | 1 | 1 | 27,60 | 2,82 | 1 | |
| 14 | Задаваемое передаточное число | | | 1 | 1 | 1 | 27,60 | 2,82 | 1 | |
| 15 | КПД элемента | $\eta_{эл}$ | | 1 | 0,995 | 1 | 0,995 | 0,960 | 1 | 1 |
| 16 | РАСЧЕТ | | | | | | | | | |
| 17 | РАЗГОН ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ | | | | | | | | | |
| 18 | 1 Угловая скорость (скорость) - приведение от двигателя | | | | | | | | | |
| 19 | Угловая скорость (скорость) вых. звена элемента | ω_2 (v2) | 1/c (м/с) | << ω | << ω | < ω | ω >> | ω >> | ω >> | ω >> |
| 20 | Обороты выходного звена элемента | n_2 | об/мин | 153 | 153 | 153 | 153 | 5,55 | (1,970) | (1,970) |
| 21 | 2 Момент инерции (масса) - приведение к двигателю/тормозу | | | 1463 | 1463 | 1463 | 1463 | 53 | | |
| 22 | Приведение к двигателю/тормозу | $J_{пр}$ ($m_{пр}$) | кг·м ² (кг) | > J | > J | > J | > J | << J | << J | << J |
| 23 | J (m) выходного звена элемента | J_2 (m_2) | кг·м ² (кг) | 0,01 | 0,04 | 1,65 | 1,24 | 1,21 | (882) | (6,998) |
| 24 | 3 Суммарн. момент (сила), передаваемый эл-том | M_2 (P_2) | Н·м (Н) | 0,013 | 0,024 | 0,377 | 0,024 | -290 | -21 217 | -21 217 |
| 25 | 3.1 Статический момент (сила) - приведение к двигателю/тормозу | | | -3 | -8 | -386 | -290 | -7 532 | (-21 217) | (-21 217) |
| 26 | Приведенный к выходному звену элемента | $M_{2ст}$ ($P_{2ст}$) | Н·м (Н) | >> | >> | > M | << | << | << | << P |
| 27 | Приведенный к входному звену элемента | $M_{1ст}$ ($P_{1ст}$) | Н·м (Н) | 379 | -7 | -185 | -7 | -185 | (-521) | (-521) |
| 28 | Момент (сила), прилож. к выходному звену элемента | $M_{2эл}$ ($P_{2эл}$) | Н·м (Н) | 379 | -7 | -185 | -7 | -185 | (-521) | (-521) |
| 29 | 3.2 Угловое ускорение/замедление | $\varepsilon_{в}$ ($a_{в}$) | 1/c ² (м/с ²) | 229,95 | 230 | 229,95 | 230 | 8,33 | (2,96) | (2,96) |
| 30 | 3.3 Угловое замедление (реж. тормож. тормозом) | $\varepsilon_{т}$ ($a_{т}$) | 1/c ² (м/с ²) | >> | >> | >> | >> | >> | >> | >> |
| 31 | 3.4 Динамический момент (сила), приведенный к двигателю/тормозу | | | M >> | M >> | > M | << | << | << | << P |
| 32 | Действующий на выходное звено элемента | $M_{2дин}$ ($P_{2дин}$) | Н·м (Н) | -2,90 | -8 | -379 | -283 | -7347 | (-20 697) | (-20 697) |
| 33 | Приведенные к входному звену элемента | $M_{1дин}$ ($P_{1дин}$) | Н·м (Н) | -2,90 | -8 | -379 | -284 | -7347 | (-20 697) | (-20 697) |
| 34 | Приложенные к выходному звену элемента | $M_{2ин.эл}$ ($P_{2ин.эл}$) | Н·м (Н) | -2,90 | -5,52 | -86,78 | -5,52 | -86,78 | (-20 697) | (-20 697) |
| 35 | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | |

Область столбцов, соответствующих элементам механизма

Рис. 1. – Модель механизма передвижения в режиме разгона/торможения двигателем

| | A | F | G | H |
|----|--|-------------|-------------|--------------|
| 6 | | Rot | Rot | Rot |
| 10 | К-т разъединения/объединения силовых потоков | 1 | 1 | 1 |
| 11 | ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | | |
| 12 | Передаточное число; КПД элемента | Тормоз | Муфта | Двиг. |
| 13 | Передаточное число элемента | 1 | 1 | 1 |
| 14 | Задаваемое передаточное число | 1 | 1 | 1 |
| 15 | КПД элемента | 1 | 0,995 | 1 |
| 16 | РАСЧЕТ | | | |
| 17 | РАЗГОН/ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ | | | |
| 18 | 1 Угловая скорость (скорость) - приведение от двигателя | << ω | << ω | < ω > |
| 19 | Угловая скорость (скорость) вых. звена элемента | 153 | 153 | 153 |
| 20 | Обороты выходного звена элемента | 1463 | 1463 | 1463 |
| 21 | 2 Момент инерции (масса) - приведение к двигателю/тормозу | J >> | >> | >J< |
| 22 | Приведение к двигателю/тормозу | 0,01 | 0,04 | 1,65 |
| 23 | J (м) выходного звена элемента | 0,013 | 0,024 | 0,377 |

Рис. 2. – Влияющие диапазоны для двух ячеек: F23 и G22.

Это одна из причин того, что вычисления для режимов разгона и торможения двигателем, а также при торможении тормозом выполняются по общим формулам в одних и тех же ячейках, хотя при необходимости их несложно разнести по разным ячейкам.

Модели приводов включены в общую модель крана в движении, однако они имеют самостоятельную ценность, и могут использоваться отдельно, например, для расчетов механизма передвижения, подъема или поворота крана – с минимальными изменениями.

Предложенный подход может быть использован для анализа различных объектов с переменной структурой.

Выводы. В статье рассматриваются особенности программы, предназначенной для моделирования процесса передвижения кранов мостового типа с перекосом. Программа должна быть применимой как для исследований, так и для инженерных расчетов, выполняемых на стадии проектирования новых кранов, а также для реконструируемых кранов, находящихся в эксплуатации. Подробнее рассматривается подмодель механизма передвижения мостового крана. В данной подмодели реализована возможность изменения кинематической схемы и определения кинематических, статических и динамических параметров для каждого элемента, что обеспечивает надежность, простоту и наглядность вычислений.

Список использованных источников: 1. Григоров О.В. Инженерные и информационные аспекты решения задачи о передвижении кранов мостового типа в среде MS Excel / Григоров О.В., Степочкина О.В. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник

наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ" – 2014р. - №7 (1050) – с. 6-12. **2.** Дащенко А.Ф., Белоконов И.М. и др. Инженерная механика. Автоматизированные расчеты механизмов и машин в системе Microsoft Excel: Учебник / Дащенко А.Ф., Белоконов И.М., Коломиец Л.В., Свинарев Ю.Н. – Одеса: СтандартЪ, 2006. – 320с. **3.** СТО 24.09-5821-01-93 Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций. **4.** ОСТ 24.090.72 - 83. Нормы расчета стальных конструкций мостовых и козловых кранов. - М., 1983. - 92 с. **5.** Шаргород А.Ю., Ложкин Г.В. Применение электронных таблиц для автоматизации управления данными САД-систем / А.Ю. Шаргород, Г.В. Ложкин // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Выпуск 158 – С. 15-17. **6.** Daily Download 6: Working with FEA programs: <http://newtonexcelbach.wordpress.com/2012/09/22/daily-download-6-working-with-fea-programs/> **7.** ExcelFEM_3D (for Excel 2007 & Excel 2010): <http://www.excelcalcP.com> **8.** Mechanical, Industrial and Technical Calculations: <http://www.mitcalc.com>

Bibliography (transliterated): **1.** Grigorov O.V., Steepochkina O.V. Inzhenernye i informacionnye aspekty reshenija zadachi o peredvizhenii kranov mostovogo tipa v srede MS Excel. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "KhPI". Zbirnik naukovih prac'. Serija: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. –Kharkov: NTU "KhPI" – 2014r. - №7 (1050) – P. 6-12. **2.** Dashhenko A.F., Belokonev I.M. i dr. Inzhenernaja mehanika. Avtomatizirovannye raschety mehanizmov i mashin v sisteme Microsoft Excel: Uchebnik – Odesa: Standart, 2006. – 320P. **3.** SТО 24.09-5821-01-93 Krany gruzopodjomnye promyshlennogo naznachenija. Normy i metody raschjota jelementov stal'nyh konstrukcij. **4.** OST 24.090.72 - 83. Normy rascheta stal'nyh konstrukcij mostovyh i kozlovyh kranov. - Moscow, 1983. - 92 P. **5.** Shargorod A.Ju., Lozhkin G.V. Primenenie jelektronnyh tablic dlja avtomatizacii upravlenija dannymi CAD-sistem. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija i pribory avtomatiki. – 2012. – Vypusk 158 – P. 15-17. **6.** Daily Download 6: Working with FEA programs: <http://newtonexcelbach.wordpress.com/2012/09/22/daily-download-6-working-with-fea-programs/> **7.** ExcelFEM_3D (for Excel 2007 & Excel 2010): <http://www.excelcalcP.com> **8.** Mechanical, Industrial and Technical Calculations: <http://www.mitcalc.com>.

Поступила (received) 15.10.2014