

Итак, на основе предлагаемой интернет-среды, поддерживающей взаимодействия в рамках кафедры, может быть осуществлена полная программная реализация системы. Это, несомненно, представляет интерес для вузов и учреждений образования РБ, а также может быть полезной для учреждений высшего образования ближнего и дальнего зарубежья.

Список литературы

1. Организация работы кафедры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mgupi.ru/today/docs/uchprocess/rabota-kafedry>. – Дата доступа: 26.11.2014.
2. Виды коммуникационного взаимодействия сотрудников в организации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://management-study.ru/vidy-kommunikacionnogo-vzaimodejstviya-sotrudnikov-v-organizacii.html>. – Дата доступа: 26.11.2014.
3. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. – М. : Вильямс, 2007. – 544 с.

© Жавнерко Е. В., Рудикова Л. В., Латицкая Н. В., 2014

УДК 004.94 : 62-231.1

С. Е. Карпович*

**Карпович Святослав Евгеньевич, д.т.н., профессор
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
mmts@bsuir.by*

И. В. Дайняк*

**Дайняк Игорь Викторович, к.т.н., доцент
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
dainiak@bsuir.by*

В. В. Поляковский*

**Поляковский Виталий Викторович, аспирант
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
mmts@bsuir.by*

Н. И. Кекиш*

**Кекиш Николай Иванович, аспирант
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
mmts@bsuir.by*

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ

Ключевые слова: имитационная модель, механизм параллельной кинематики, система управления.

Рассматриваются вопросы динамического анализа прецизионной координатной системы перемещений на базе механизма параллельной кинематики. Разработана и реализована в среде MATLAB/Simulink имитационная динамическая модель, которая позволяет проводить моделирование заданного закона движения исполнительской платформы механизма, а также выполнять решение прямой и обратной задач динамики с интерактивной визуализацией пространственных состояний всех подвижных звеньев.

Построение координатной системы для реализации сложных пространственных перемещений с повышенными точностными и динамическими характеристиками требует проведения динамического анализа исполнительного звена системы, под которым понимается исполнительный механизм параллельной кинематики.

матики, совершающий технологические операции перемещения, обработки или измерения. В процессе динамического анализа исполнительного механизма координатной системы перемещений решаются задачи разработки и непосредственно реализации математической модели, описывающей динамическое состояние и поведение механизма в движении и равновесии при наличии внешних силовых воздействий; на базе построенной динамической модели исполнительного механизма решаются прямая и обратная задачи динамики, в среде моделирования проводится симуляция работы динамической модели для конкретных случаев отработки исполнительным механизмом заданных перемещений [1, 2]. На основании результатов, полученных при проведении динамического анализа, можно определить требования и выработать рекомендации к управляющим двигателям координатной системы перемещений в виде выходных характеристик изменения вращающих моментов, скоростей, ускорений, пиковых нагрузок, необходимых для реализации заданного закона движения исполнительного механизма. Построенная динамическая модель выступает оптимальным средством настройки и верификации регулятора системы управления, так как учитывает одновременно и динамические, и кинематические особенности исполнительного механизма.

Рассмотрим динамический анализ на примере исполнительного механизма на шести поворотных двигателях, структура которого показана на рис. 1.

Этот параллельный механизм, по нашему мнению, является наиболее общим случаем структурного исполнения приведенных выше механизмов параллельной кинематики.

В рамках динамического анализа осуществляется решение прямой и обратной задач динамики исполнительного механизма [2]. Прямая задача динамики заключается в определении закона движения платформы в зависимости от заданного изменения вращающих моментов, прилагаемых к входным кривошипам исполнительного механизма. Обратная задача динамики состоит в определении функциональной зависимости изменения вращающих моментов, прилагаемых к входным кривошипам исполнительного механизма, для реализации заданного закона движения платформы. На рис. 2 наглядно показана схема решения прямой и обратной задач динамики, построенная на динамической модели исполнительного механизма.

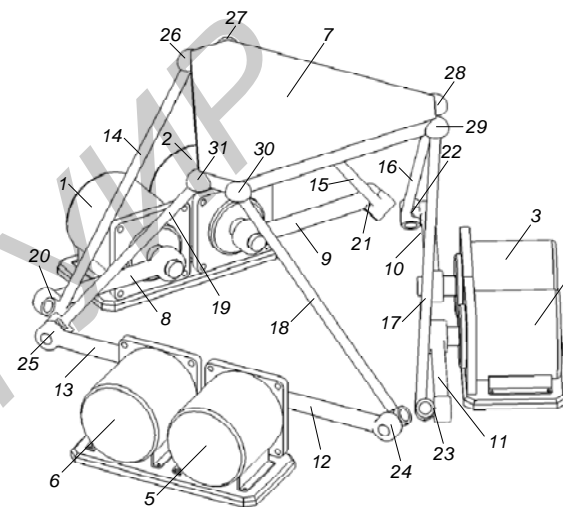


Рис. 1. Структурная схема системы перемещений с шестью степенями свободы:
 1, 2, 3, 4, 5, 6 – поворотные приводы прямого действия;
 7 – подвижная платформа;
 8, 9, 10, 11, 12, 13 – входные кривошипы; 14, 15, 16, 17, 18, 19 – промежуточные шатуны;
 20, 21, 22, 23, 24, 25 – карданные соединения;
 26, 27, 28, 29, 30, 31 – сферические соединения

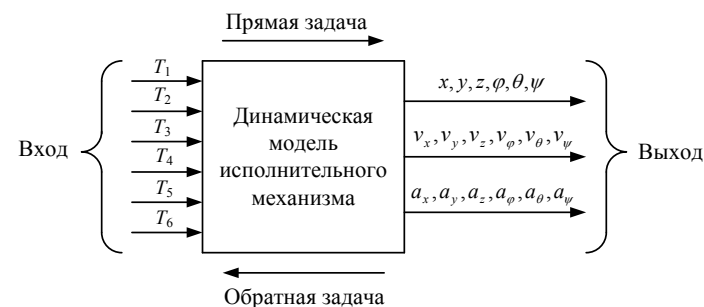


Рис. 2. Схема решения прямой и обратной задач динамики

На сегодняшний день среди наиболее распространенных подходов к описанию и построению динамических моделей механизмов параллельной кинематики выделяют концепцию, основанную на аналитической механике Лагранжа [3, 4], и описание на базе уравнений Ньютона-Эйлера [5, 6].

Динамическая модель механической системы строится на основании уравнений Ньютона

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1)$$

и уравнений Эйлера

$$\begin{aligned} \tau_1 &= I_1 \frac{dw_1}{dt} - w_2 w_3 (I_2 - I_3); \\ \tau_2 &= I_2 \frac{dw_2}{dt} - w_3 w_1 (I_3 - I_1); \\ \tau_3 &= I_3 \frac{dw_3}{dt} - w_1 w_2 (I_1 - I_2), \end{aligned} \quad (2)$$

описывающих соответственно поступательное и вращательное движение звеньев механизма в пространстве.

В этих уравнениях F – суммарная сила, действующая на тело, совершающее поступательное движение; m – масса тела; x – координата центра масс; τ_1, τ_2, τ_3 – вращающие моменты вокруг осей системы координат, жестко связанной с телом; I_1, I_2, I_3 – моменты инерции тела по главным осям вращения; w_1, w_2, w_3 – скорости изменения углов Эйлера осей, связанных с телом.

Уравнения Эйлера (2) справедливы для системы отсчета, жестко связанной с вращающимся телом. В этой системе тензор момента инерции постоянен, а координата центра масс используется в качестве точки вращения.

На основании уравнений Ньютона-Эйлера можно составить набор взаимосвязанных выражений, описывающих все силы, вращающие моменты, скорости, ускорения, действующие на звенья механической системы, в структуре, позволяющей рекурсивное решение. Для заданного движения выходного звена механизма можно определить соответствующие скорости и ускорения всех структурных частей, а затем последовательно, в рекурсивной форме, начиная с активных кинематических пар, найти силы и вращающие моменты, обеспечивающие данное дви-

жение. В случае механизмов параллельной кинематики в описание динамической модели вводят дополнительные ограничения, учитывающие особенности замкнутых кинематических цепей.

Следует отметить, что рекурсивная форма динамической модели на базе уравнений Ньютона-Эйлера является более эффективной в сравнении с описанием на основе аналитической механики Лагранжа с точки зрения вычислительных затрат для проведения расчетов, поэтому ее использование для динамического анализа исполнительного механизма в режиме реального времени средствами компьютерного моделирования является предпочтительным.

Для моделирования движения платформы механизма нами предложена имитационная динамическая модель управления со структурной схемой, представленной на рис. 3.

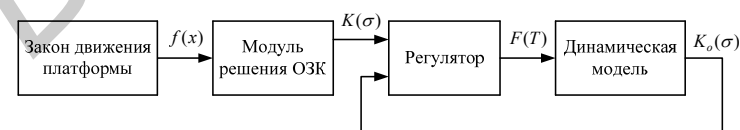


Рис. 3. Структурная схема имитационной динамической модели управления параллельным механизмом

На рис. 3 в схеме имитационной динамической модели управления обозначены: $f(x)$ – задаваемый закон движения платформы; $K(\sigma)$ – функция изменения обобщенных угловых координат входных кривошипов механизма; $F(T)$ – функция изменения вращающих моментов на входных кривошипах; $K_o(\sigma)$ – текущие угловые координаты входных кривошипов. Модуль решения обратной задачи кинематики (ОЗК) осуществляет вычисление обобщенных угловых координат кривошипов для заданных параметров положения и ориентации платформы параллельного механизма.

Регулирование в модели осуществляется с помощью шести независимых регуляторов, каждый из которых, в свою очередь, построен на основе ПИД-регулятора, реализующего функцию управления вращающим моментом следующего вида:

$$F(t) = K_p E_\sigma + K_i \int_0^t E_\sigma dt + K_d \left(\frac{dE_\sigma}{dt} \right), \quad (3)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент; K_i – интегральный коэффициент; K_d – дифференциальный коэффициент; E_{\square} – ошибка по положению, определяемая как разность между текущими и заданными обобщенными угловыми координатами кривошипа.

Структурная схема регулятора имитационной динамической модели управления параллельным механизмом представлена на рис. 4.

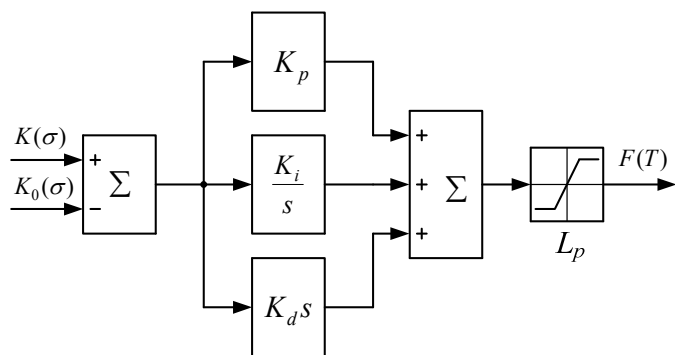


Рис. 4. Структурная схема регулятора имитационной динамической модели управления параллельным механизмом

На входы регулятора в каждый момент времени подаются значения текущих и заданных обобщенных угловых координат входных кривошипов, а на выходе в соответствии с функцией управления (3) формируется вращающий момент, ограниченный с помощью функционального элемента L_p до заданного максимального уровня, зависящего от технических параметров используемых двигателей.

Следует отметить, что регулятор имитационной динамической модели управления исполнительным механизмом обеспечивает высокое качество регулирования при его оптимальной настройке, включающей определение наиболее подходящих значений пропорционального, интегрального и дифференциального коэффициентов [7]. Выбор соответствующих коэффициентов для ПИД-регулирования в данном случае зависит от технологических операций, реализуемых исполнительным механизмом, а также от технических характеристик используемых двигателей.

Непосредственная реализация имитационной динамической модели управления параллельным механизмом в среде MATLAB/Simulink представлена на рис. 5.

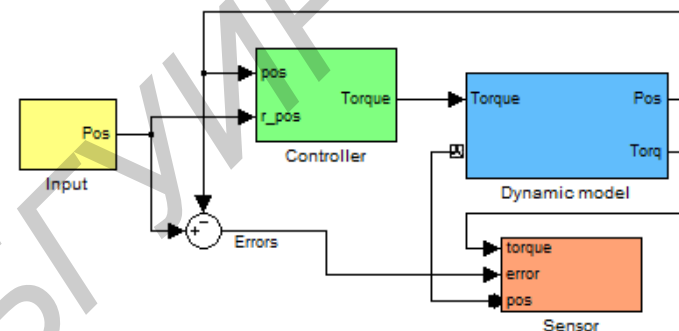


Рис. 5. Имитационная динамическая модель управления параллельным механизмом в среде MATLAB/Simulink

В соответствии с рис. 5 функциональный блок *Input* задает закон движения платформы и осуществляет расчет обобщенных угловых координат входных кривошипов механизма путем решения обратной задачи кинематики, блок *Controller* выполняет функцию регулятора, *Dynamic model* – динамическая модель параллельного механизма, *Sensor* обеспечивает получение и вывод характеристик динамической модели.

Разработанная имитационная динамическая модель позволяет проводить моделирование заданного закона движения платформы параллельного механизма и получать такие оцениваемые характеристики, как положение, скорость, ускорение платформы, изменение вращающих моментов на входных кривошипах, реакционные силовые взаимодействия кинематических узлов механизма.

Следует отметить, что для четырех рассмотренных в настоящей работе случаев моделирования движения была использована имитационная динамическая модель управления исполнительным механизмом со следующими настройками регулятора: $K_p = 120$; $K_i = 10$; $K_d = 2$; $L_p = 100$ Н·м. Как показывают полученные нами характеристики переходного процесса, отражающего изменение положения платформы по координатам x и y при ступенчатом варьировании входных параметров, данные на-

стройки обеспечивают высокое качество регулирования. Полученные силовые характеристики отражают порядок изменения вращающих моментов на кривошипных исполнительного механизма при реализации заданного движения платформы и могут быть использованы в качестве требований и рекомендаций к выбору управляющих двигателей координатной системы перемещений.

Представленная динамическая модель базируется на уравнениях связи силовых характеристик многокоординатного привода с текущим пространственным положением и перемещениями рабочей платформы в трехмерном пространстве. На основании динамической модели и предложенных алгоритмов решения прямой и обратной задач динамики было разработано программное обеспечение в среде MATLAB/Simulink для исследования динамических характеристик рассматриваемых механизмов. Динамическая модель в среде MATLAB/Simulink строится в виде блок-схемного описания механической структуры с помощью соответствующих функциональных элементов. Массогабаритные параметры структурных частей задаются в соответствующих настроечных формах. В процессе компьютерного моделирования автоматически осуществляется преобразование блок-схемы в эквивалентную математическую модель на базе одного из типов уравнений Ньютона, Лагранжа, Ньютона – Эйлера или других, имеющихся в MATLAB/Simulink. Поддержка интеграции с CAD-платформами такими, как Pro/ENGINEER, SolidWorks и др. позволяет автоматически импортировать структурно-параметрическое описание модели исполнительного механизма в среду MATLAB/Simulink.

Численные результаты имитационного моделирования базового механизма параллельной кинематики, полученные по разработанной в среде MATLAB/Simulink программе, включая координатное представление текущего состояния платформы и механизма в целом, изменение скорости и ускорения движения платформы по всем шести независимым координатам (x , y , z , φ , θ , ψ), позволяют получить полный набор расчетных силовых характеристик, необходимых для выбора исполнительных двигателей многокоординатного электропривода.

Имитационная модель динамики может быть также использована для моделирования реконфигурируемых механизмов, представляемых в виде модульного описания их механической

структуры в среде MATLAB/Simulink. Она позволяет выполнить решение прямой и обратной задач динамики с интерактивной визуализацией пространственных состояний всех подвижных звеньев при реализации прецизионных программируемых движений многокоординатными системами перемещений.

Список литературы

1. Карпович С. Е. Прецизионные системы перемещений / С. Е. Карпович, Ю. С. Межинский, В. В. Жарский // Доклады БГУИР. – 2004. – № 3(7). – С. 50-61.
2. Литвинов Е. А. Моделирование динамики параллельного механизма с шестью степенями свободы в среде MATLAB/Simulink // Теоретическая и прикладная механика. – 2009. – № 24. – С. 267-272.
3. Аналитическая механика и мехатронные системы перемещений / под ред. С. Е. Карповича. – Минск : Технопринт, 2004. – 187 с.
4. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. – М. : Наука, 1988. – 328 с.
5. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под общ. ред. М. Г. Чиликина. – М. : Энергия, 1971. – 562 с.
6. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. – М. : Наука, 1986. – 103 с.
7. Автоматизированное проектирование следящих приводов и их элементов / под ред. В. Ф. Казмиренко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

© Карпович С. Е., Дайняк И. В., Поляковский В. В., Кекиш Н. И., 2014