Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 https://naukovedenie.ru/

Том 9, №5 (2017) https://naukovedenie.ru/vol9-5.php

URL статьи: https://naukovedenie.ru/PDF/91TVN517.pdf

Статья опубликована 24.11.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:
Лапиков А.Л., Масюк В.М., Потапов А.А., Федоров А.А. Моделирование движения двухсекционного механизма параллельной структуры с вращательными приводами в кинематических цепях // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) https://naukovedenie.ru/PDF/91TVN517.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.86/.87

Лапиков Антон Леонидович
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Филиал в г. Калуга, Россия, Калуга[1]
Ассистент кафедры М6-КФ «Мехатроника и робототехника»
E-mail: anton.lapikov@inbox.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=801711

Масюк Владимир Михайлович
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Филиал в г. Калуга, Россия, Калуга
Доцент кафедры М6-КФ «Мехатроника и робототехника»
Кандидат физико-математических наук
E-mail: masyuk77@mail.ru
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3543-2781
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=110211
SCOPUS: http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7801670833

Потапов Андрей Алексеевич[2]
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Филиал в г. Калуга, Россия, Калуга
Студент
E-mail: AndrewPotapov@yandex.ru

Федоров Александр Александрович[3]
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Филиал в г. Калуга, Россия, Калуга
Студент
E-mail: Sf090@yandex.ru

[1] 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

[2] https://vk.com/id69330371

[3] https://vk.com/fedorovfedorov

Моделирование движения двухсекционного механизма параллельной структуры с вращательными приводами в кинематических цепях

Аннотация. В данной работе исследуется проблема построения математической модели сложной технической системы на примере пространственного механизма параллельной структуры с вращательными кинематическими парами в каждой цепи.

Поднимается проблема ресурсоемкости и сложности исследования сложных механических систем классическими методами. Для упрощения решения и визуализации результатов предлагается использовать возможности современных CAD систем в совокупности с возможностями математических пакетов. Для оценки эффективности методики применялось сравнение результатов, полученных при моделировании с использованием предложенного подхода, с аналитическими результатами, которые могут быть получены из ранее составленной математической модели, основные зависимости которой также приводятся в работе.

Сформулированы основные требования к модели, получаемой с помощью CAD системы, указаны необходимые допущения. На примере механизма параллельной кинематики показаны результаты трансляции 3D модели из CAD системы в пакет Matlab, указаны наиболее часто встречающиеся проблемы при трансляции и приведены общие указания по их решению. В ходе работы была выявлена проблема моделирования кинематических пар 3-го класса, связанная с большими вычислительными затратами, и предложен подход к оптимизации. Был описан алгоритм устранения данной проблемы, основанный на понижении класса кинематической пары путем замены блоков модели, и предложен математический аппарат для вычисления необходимой информации для корректной работы этих блоков, что привело к значительному ускорению моделирования, которое было подтверждено экспериментально.

С использованием данного подхода была показана возможность моделирования движения системы. Проведено сравнение результатов, полученных с помощью данного подхода и ранее предложенной математической модели. Проанализированы полученные рассогласования между результатами, даны пояснения о характере и причинах их возникновения. Сделан вывод о корректности предложенной методики.

Ключевые слова: механизмы параллельной структуры; кинематическая цепь; моделирование движения; 3D-модель; оценка точности

Введение

Как известно [1], вопрос о необходимости и достаточной мере сходства оригинала и модели является более чем насущным, особенно в сложных технических системах. Обычно построение модели начинают с выделения наиболее существенных признаков, затем производится первичный анализ и построение предварительной модели, модель анализируется, а далее процесс уточнения производится итерационно.

Современные исследования в области машиностроения требуют моделей сложных технически систем [2-8]. Так, например, многосекционные механизмы параллельной структуры, характеризующиеся большим числом степеней подвижности (12 и более), очень сложны в исследовании и часто не являются очевидными и наглядными.

Подобный подход при наличии такой сложной системы приводит к большим вычислительным, временным и трудовым затратам.

Целью данной работы является демонстрация эффективности подхода к построению моделей, основанного на использовании современных средств САПР и систем вычислительного моделирования, и подтверждение того факта, что данный подход не несет потери точности модели, на примере двухсекционного механизма, обладающего 12 степенями подвижности.

Объект исследования

В данной работе в качестве объекта исследования выбран механизм параллельной структуры с вращательными приводами в кинематических цепях, секции которого описаны в работе [9]. Данный механизм, с точки зрения описания положения его исполнительного органа (верхней платформы) в пространстве, является весьма сложной задачей при моделировании, поскольку характеризуется 12 степенями свободы и наличием замкнутых кинематических цепей.

Модель исследуемого механизма представлена на рис. 1.

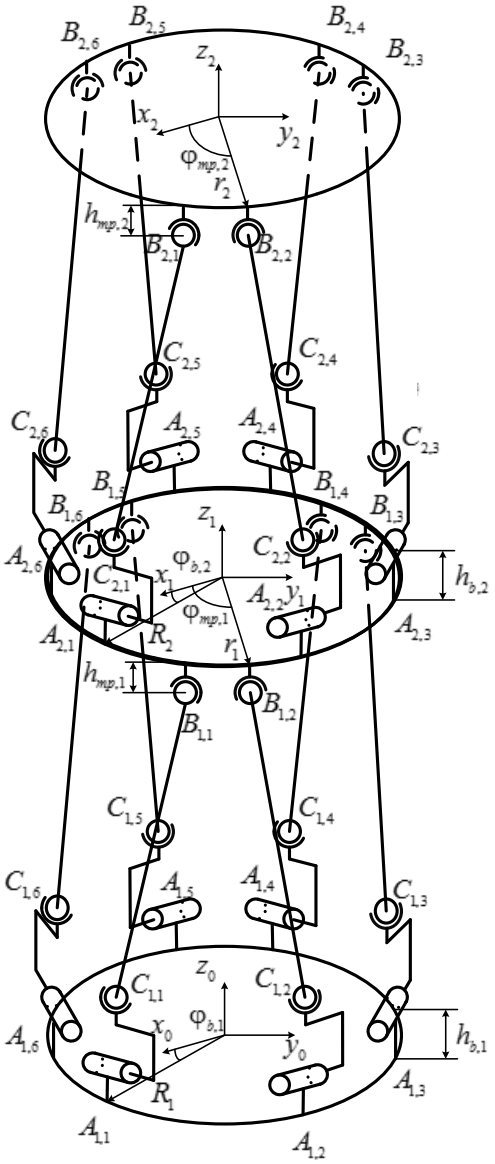


Рисунок 1. *Двухсекционный механизм параллельной структуры с вращательными приводами (составлен авторами)*

Входные вращательные пары секции обозначим точками $A_{i,j}, i=\overline{1..2}, j=\overline{1..6}$, где индекс i характеризует принадлежность сферической пары к определенной секции, а индекс j определяет номер пары в секции. Выходные сферические пары секции обозначим точками $B_{i,j}, i=\overline{1..2}, j=\overline{1..6}$, где индексы используются аналогичным образом. Промежуточные сферические пары обозначим точками $C_{i,j}, i=\overline{1..2}, j=\overline{1..6}$. Входные и выходные звенья каждой секции будем считать идеальными дисками. Свяжем локальные системы координат с выходным звеном каждой секции. При этом центр системы координат расположим в центре идеального диска, оси $o_i x_i$ и $o_i y_i$ считаем лежащими в плоскости диска, ось $o_i z_i$ перпендикулярна плоскости диска. Положением и ориентацией многосекционного механизма в пространстве будем считать положение и ориентацию системы координат выходной секции. Пусть входные и выходные пары располагаются в вершинах шестиугольников с радиусами R_i и r_i соответственно. Здесь индекс i обозначает принадлежность к секции. Величины отрезков $A_{i,j}C_{i,j}$ и $C_{i,j}B_{i,j}$ обозначим за $l_{i,1}$ и $l_{i,2}$. В большинстве моделей механизмов параллельной структуры вводят допущение о том, что шарнирные сочленения лежат в плоскости платформ, однако для многосекционного механизма данное допущение с увеличением числа секций приведет к снижению точности модели, поэтому будем считать, что входные и выходные пары секций отстоят от плоскостей основания и выходного звена $i-$ой секции на величины $h_{b,i}$ и $h_{mp,i}$ соответственно. Для определения координат шарниров введем параметры $\varphi_{b,i}$ и $\varphi_{mp,i}$, определяющие угловые координаты первого шарнира основания и подвижной платформы для $i-$ой секции. В качестве обобщенных координат данного механизма будем использовать углы между кулисой, соединяющей входную кинематическую пару $A_{i,j}$ с промежуточной сферической парой $C_{i,j}$, и нормалью к плоскости основания $i-$ой секции. Обозначим данную величину $\theta_{i,j}, i=\overline{1..2}, j=\overline{1..6}$.

Для подобного механизма определение положения может быть рассмотрено либо как решение системы из 18 нелинейных уравнений, либо с помощью алгоритма, описанного в работе [10], в которой решение сводится к двум системам из 9 уравнений (2).

$$\begin{cases} \left(x_{U_i}-x_{V_i}\right)^2+\left(y_{U_i}-y_{V_i}\right)^2+\left(z_{U_i}-z_{V_i}\right)^2=\Delta^2_{U_iV_i}, \\ \left(x_{U_i}-x_{W_i}\right)^2+\left(y_{U_i}-y_{W_i}\right)^2+\left(z_{U_i}-z_{W_i}\right)^2=\Delta^2_{U_iW_i}, \\ \left(x_{V_i}-x_{W_i}\right)^2+\left(y_{V_i}-y_{W_i}\right)^2+\left(z_{V_i}-z_{W_i}\right)^2=\Delta^2_{V_iW_i}, \\ \left(\mathbf{D}_{i,1,1}-\mathbf{C}_{1,1}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,2,1}-\mathbf{C}_{1,2}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,3,1}-\mathbf{C}_{1,3}\right)^2=l^2_{i,2}, \\ \left(\mathbf{D}_{i,1,2}-\mathbf{C}_{2,1}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,2,2}-\mathbf{C}_{2,2}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,3,2}-\mathbf{C}_{2,3}\right)^2=l^2_{i,2}, \\ \left(\mathbf{D}_{i,1,3}-\mathbf{C}_{3,1}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,2,3}-\mathbf{C}_{3,2}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,3,3}-\mathbf{C}_{3,3}\right)^2=l^2_{i,2}, \\ \left(\mathbf{D}_{i,1,4}-\mathbf{C}_{4,1}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,2,4}-\mathbf{C}_{4,2}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,3,4}-\mathbf{C}_{4,3}\right)^2=l^2_{i,2}, \\ \left(\mathbf{D}_{i,1,5}-\mathbf{C}_{5,1}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,2,5}-\mathbf{C}_{5,2}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,3,5}-\mathbf{C}_{5,3}\right)^2=l^2_{i,2}, \\ \left(\mathbf{D}_{i,1,6}-\mathbf{C}_{6,1}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,2,6}-\mathbf{C}_{6,2}\right)^2+\left(\mathbf{D}_{i,3,6}-\mathbf{C}_{6,3}\right)^2=l^2_{i,2}. \end{cases} \quad (1)$$

где: $\Delta_{U_iV_i}, \Delta_{V_iW_i}, \Delta_{W_iU_i}$ – расстояние между виртуальными точками, $l_{i,2}$, $i=\overline{1..6}$ – длина кулисы, соединяющей точки $C_{i,j}$ и $B_{i,j}$, $\mathbf{C}_{j,k}$ – координаты точек $C_{i,j}$ $i-$ой секции, $\mathbf{D}_{i,j,k}$ – координаты шарниров подвижной платформы $i-$ой секции, выраженные через координаты виртуальных точек. Система (1) описывает кинематические соотношения для секции и была получена в работе [9].

Использование возможностей CAD систем и Matlab при построении модели сложных технических систем

Возможности пакета Matlab, де-факто являющимся стандартом научных вычислений, позволяют импортировать и производить анализ моделей, полученных в различных CAD системах [11, 12]. Покажем эффективность такого подхода на примере вышеуказанного механизма. Для этого в CAD системе SolidWorks была разработана упрощенная 3D-модель двухсекционного механизма параллельной структуры (рис. 2). Отметим особенности построения и допущения, используемые в модели:

- модель содержит минимум элементов, полностью реализующих кинематическую схему,
- модель может реализовывать все возможные перемещения,
- модель предельно упрощена конструктивно,
- модель корректно передает массо-габаритные характеристики.

Рисунок 2. *3D-модель механизма (составлен авторами)*

Механизм импорта модели позволяет сформировать блочную модель Matlab/Simulink с учетом массовых, инерционных, габаритных характеристик, а также всех ограничений на допустимые движения исходной 3D-модели (рис. 3).

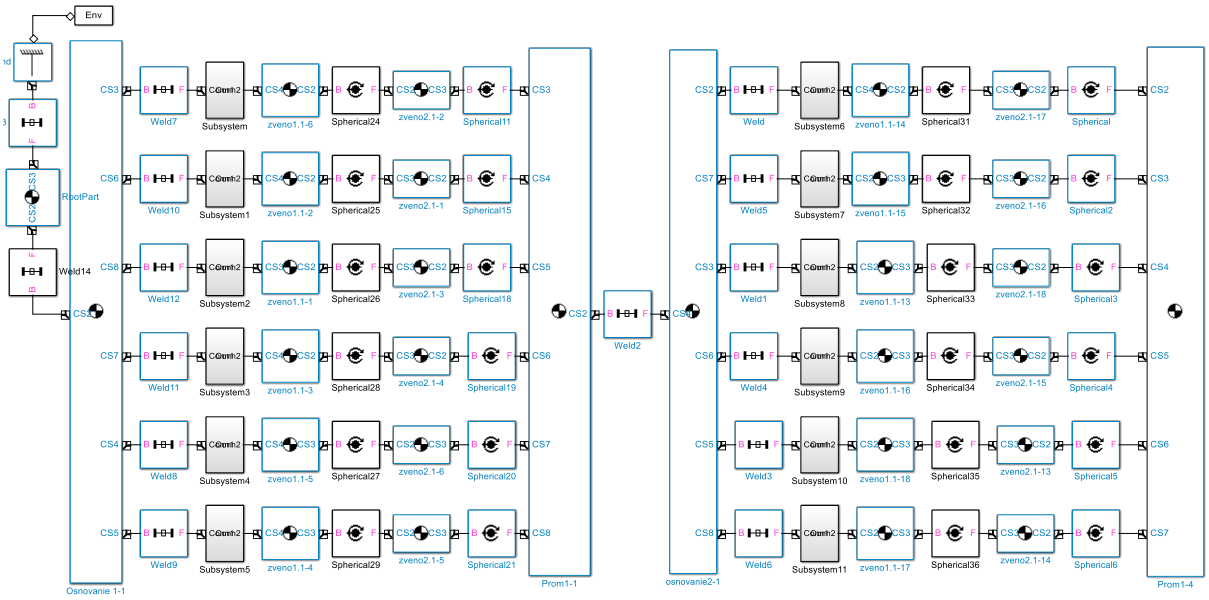


Рисунок 3. *Сформированная блочная модель (составлен авторами)*

Из рисунка понятно, что схема содержит две соединенные между собой платформы, каждая из которых содержит по шесть отдельных кинематических цепей. Под номерами на рисунке обозначены: 1 – автоматически сформированные транслятором блоки, 2 – основание, 3 – блок жесткого соединения, 4 – сервопривод, 5 – коромысло, 6 – универсальные шарниры, 7 – штанга, 8 – сферические шарниры, 9 – первая платформа; 10 – вторая платформа (выходное звено механизма).

Автоматически сформированные пакетом Simmechanics блоки необходимы для установки режима симуляции и определения начала отсчета системы координат модели.

При моделировании полученной схемы в Matlab/Simulink требуются большие вычислительные ресурсы, но возможно модифицировать модель путем замены сферических шарниров, установленных между кривошипом и штангой (рисунок 3), на универсальные, которые исключают собственное вращение штанг вокруг своей оси и существенно (на порядки) ускоряют моделирование. Модифицированная схема представлена на рис. 4.

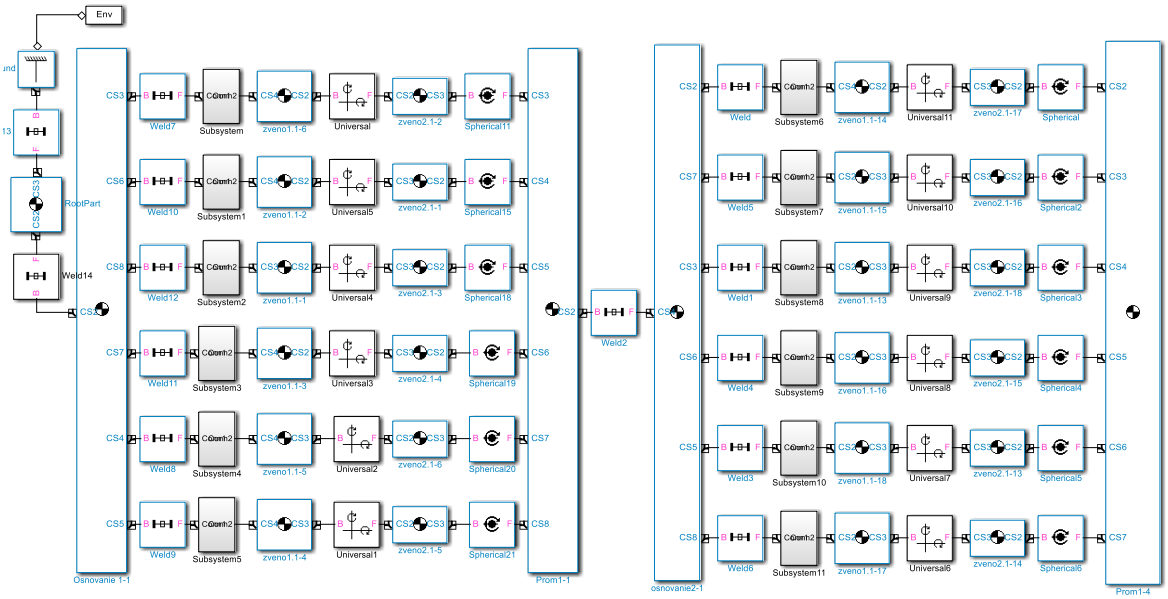


Рисунок 4. *Сформированная блочная модель (составлен авторами)*

При замене для нормального функционирования блоков универсального шарнира необходимо рассчитать вектора, вокруг которых происходит вращение в данном сочленении. Эти вектора будут перпендикулярны вектору, направленному вдоль штанги, и алгоритм будет иметь следующий вид:

- определить координаты точек вектора направления штанги, которые определяются как вектор, соединяющий крайние точки блоков штанги (координаты их могут быть получены из настроек соответствующих блоков);
- найти координаты вектора, который перпендикулярен данному вектору, используя свойства скалярного произведения перпендикулярных векторов и путем элементарных преобразований установить, что координата z одного из искомых векторов может быть найдена из соотношения:

$$z_2 = \frac{-(x_1 x_2 + y_1 y_2)}{z_1}$$

- координаты третьего вектора найти, воспользовавшись свойствами векторного произведения о том, что результирующий вектор и два перемножаемых образуют правую тройку векторов.

Рассмотрим данную методику применительно к нашей модели на примере первой (верхней на рис. 4) кинематической цепи первой секции. Из характеристик блока Body извлекаем данные о координатах точек крепления (CS2 и CS1 – стандартные обозначения пакета Matlab).

Отсюда, координаты точек крепления равны:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0{,}226433 & 0{,}471656 & 0{,}313258 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0{,}191739 & 0{,}311405 & 0{,}316722 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{AB} = \begin{bmatrix} 0{,}034694 & 0{,}160251 & -0{,}003464 \end{bmatrix}$$

Из второго пункта методики получаем, что координаты второго вектора:

$$\mathbf{CD} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 56{,}277424 \end{bmatrix},$$

который можно пронормировать, но можно оставить и без изменений.

Последний вектор $\mathbf{KT} = \mathbf{AB} \times \mathbf{CD}$:

$$\mathbf{KT} = \begin{bmatrix} 9{,}021977 & -1{,}955952 & -0{,}125557 \end{bmatrix}.$$

Найденные вектора записываем в настройки блока Universal.

Для приведения механизма в движение необходимо дополнить модель виртуальным приводом для передачи движения на вал сервопривода, и тем самым изменять положение кривошипов. Добавляем блоки приводов шарниров JointActuator к блокам вращательных кинематических пар Revolute. В настройках блока JointActuator указываем тип воздействия: движение (Motion). При помощи блоков Constant, генерирующих сигнал постоянной величины и блоков Mux, совмещающих несколько входящих сигналов в один вектор.

Для этого каждую из ранее созданных подсистем, отвечающих за моделирование сервоприводов, необходимо доработать, как показано на рис. 5. Закон изменения для каждой обобщенной координаты формируется как отдельная переменная в среде Matlab (извне по

отношению к модели) и для удобства анализа передается в Simulink модель посредством блока FromWorkspace.

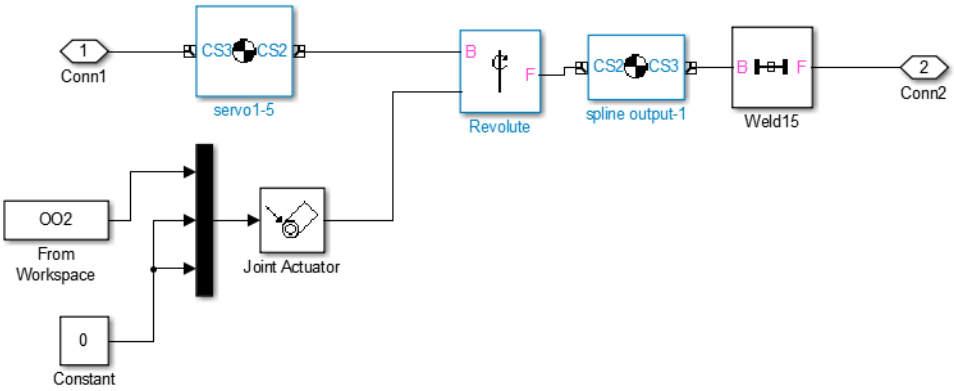


Рисунок 5. *Блоки приводов шарниров с задающим воздействием по углу, подключенный к механической системе (составлен авторами)*

Под движением будем понимать перемещение центра масс второй платформы, и для снятия данных о движении системы дополним модель блоками виртуальных датчиков BodySensor, как показано на рис. 6.

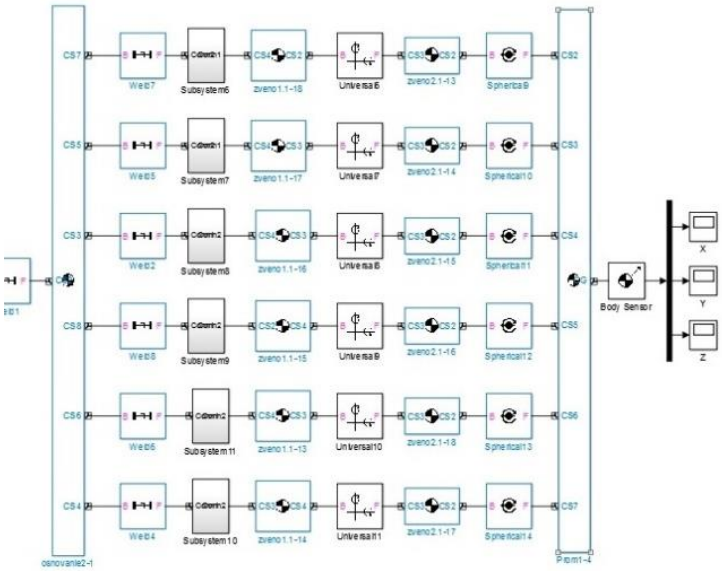


Рисунок 6. *Подключение виртуального датчика BodySensor и блока вывода графиков Scope (составлен авторами)*

Пример моделирования

В качестве одного их экспериментов было продемонстрируем перемещение центра масс второй платформы из начального положения в точку с координатами $\begin{bmatrix}130 & 0 & 475\end{bmatrix}$. Траектория в виде проекции на оси проиллюстрирована на рис. 7.

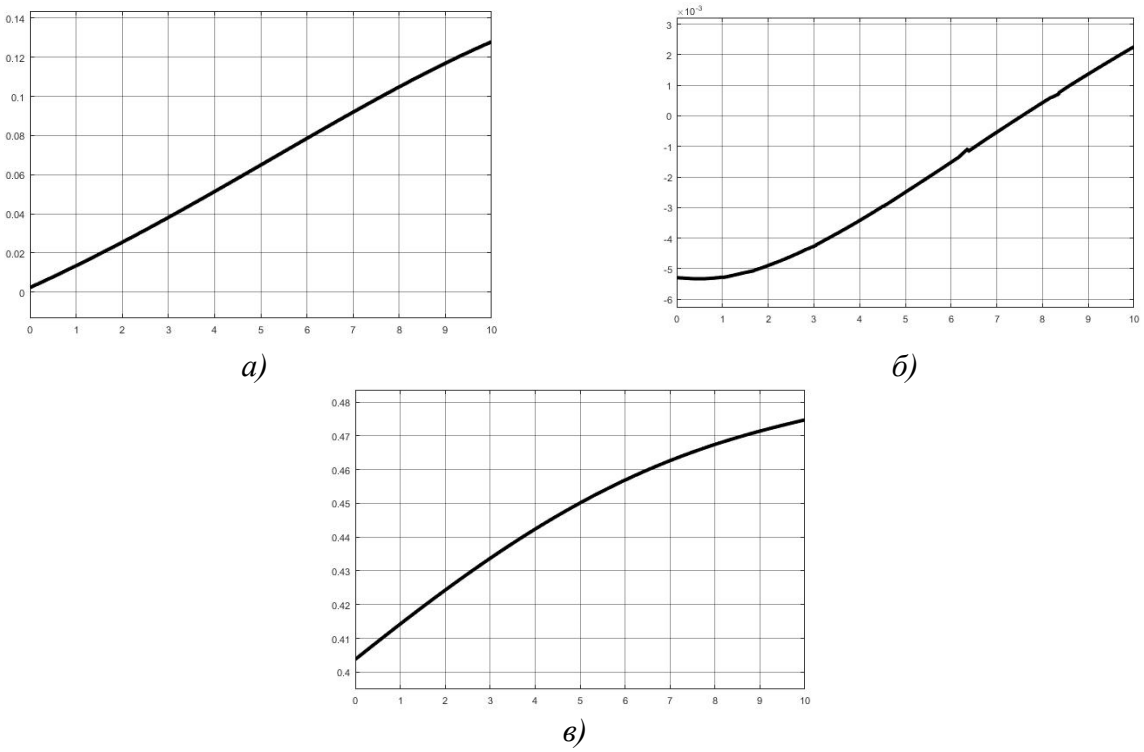


Рисунок 7. *Изменение координат центра масс верхней платформы:*

а) по оси o_0x_0 *(составлен авторами);*

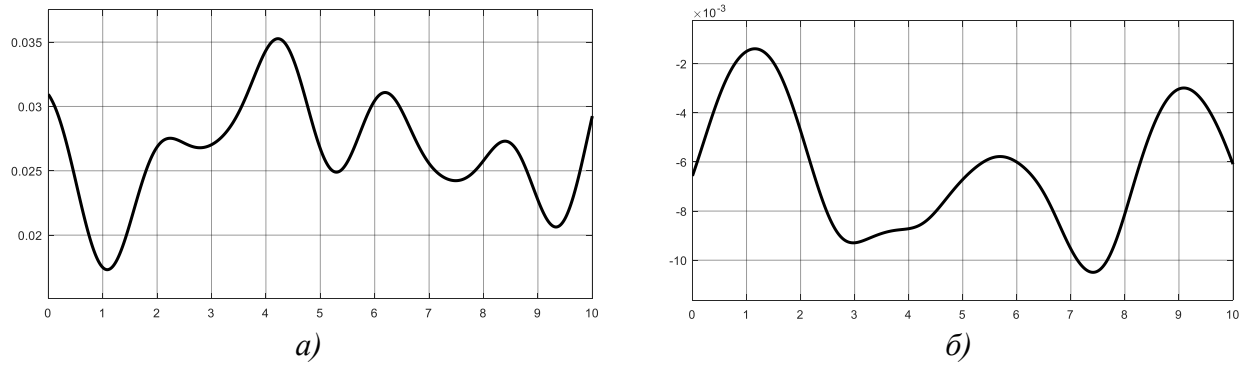
б) по оси o_0y_0 *(составлен авторами);*

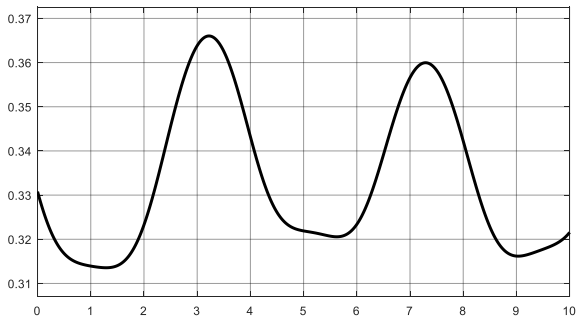
в) по оси o_0z_0 *(составлен авторами)*

Для оценки эффективности модели приведем сравнение результатов моделирования движения данной системы с полученным ранее теоретическими выкладками.

Для исследования сравнения точности получаемых результатов были получены два решения: одно по методике, описанной в [9], другое – по методике, представленной в данной статье. Законы изменения обобщенных координат для всех шести координат нижней платформы примем $\theta_{1,j}(t) = 30 + 10\sin(t),\ j = \overline{1..6}$, для верхней платформы – $\theta_{2,j}(t) = 50 + 40\sin(1{,}5t),\ j = \overline{1..6}$. Таким образом, центр масс верхней платформы движется в вертикальной плоскости по заданному закону. Смещения по осям o_0x_0 и o_0y_0, соответственно, равны нулю.

Графики изменения положения центра масс верхней платформы представлены на рисунке 8.





в)

Рисунок 8. *Изменение координат центра масс верхней платформы*

а) по оси o_0x_0 *(составлен авторами);*

б) по оси o_0y_0 *(составлен авторами);*

в) по оси o_0z_0 *(составлен авторами)*

Анализируя полученные решения, видно, что абсолютная ошибка по осям X и Y определяется вычислительными погрешностями, наличием инерционных масс и пересчетом в шарнирах околонулевых значений. При различных законах обобщенных координат данная ошибка может изменяться на несколько порядков.

Более интересна оценка ошибки для значимых данных по оси o_0z_0 : решении системы уравнений (1) численными методами [9], найдем разность между таким решением и решением, полученным в результате моделирования. Обозначим ее как:

$$\Delta z = z^{\text{num}} - z^{\text{mod}},$$

где: z^{num} – величина, полученная из математической модели, z^{mod} – величина, полученная из блочной модели в Matlab, и представим ее на графике (рис. 9).

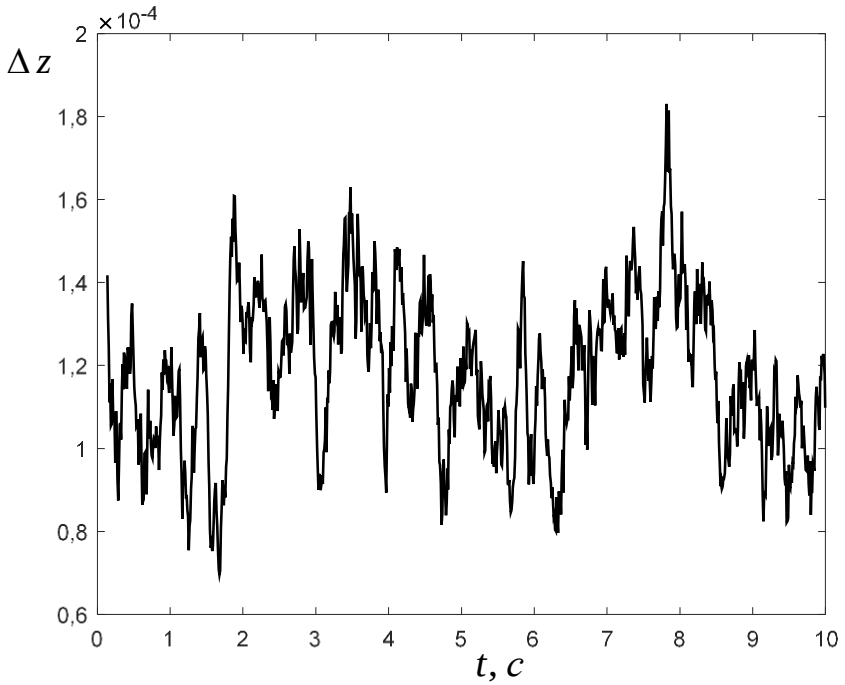


Рисунок 9. *Ошибка по оси* o_0z_0 *(составлен авторами)*

Из рис. 9 видно, что абсолютная ошибка не превышает $2 \cdot 10^{-4}$, что также согласуется с ошибкой, полученной по другим осям. Исходя из того, что значения сдвига по осям o_0x_0 и o_0y_0 равны нулю при заданном воздействии $\Delta x_{\max} \le 0,035$, $\Delta y_{\max} \le 0,01$.

Для оценки влияния иных факторов (достаточно большого значения дискретного времени $\Delta t = 0,01\text{c}$, влияния модулей приводов и прочее) проведем сглаживание полученной ошибки $\Delta z(t)$ и представим график ошибки, совмещенный с графиком движения по оси o_0z_0 в соответствующих масштабах (рис. 10).

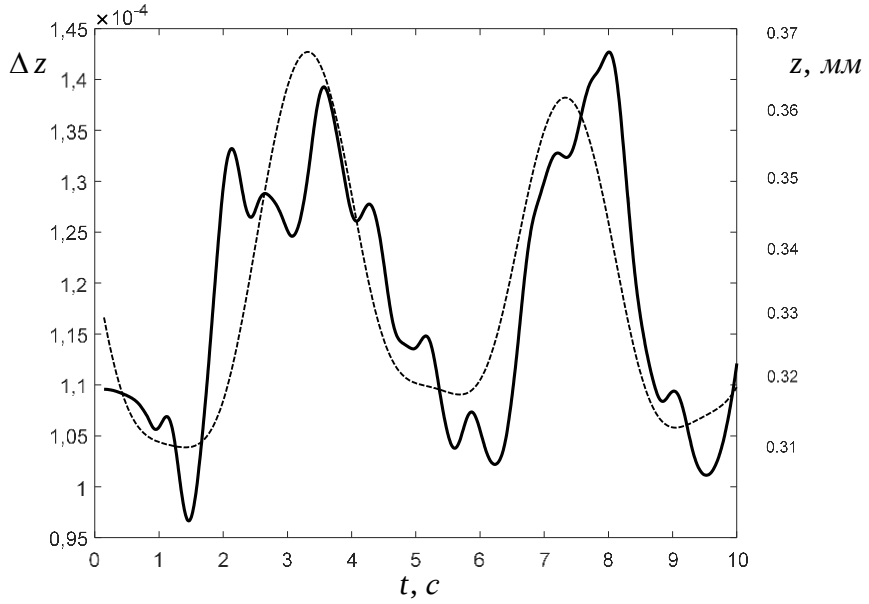


Рисунок 10. *Графики ошибки и движения по оси* o_0z_0 *(составлен авторами)*

Ситуация, проиллюстрированная на графике, может быть объяснена тем, что ошибка носит мультипликативный характер, а сдвиг графика ошибки относительно графика перемещения – наличием весьма большого времени запаздывания дискретной системы и последующей (для вывода графика) цифровой фильтрации.

Вышесказанное позволяет судить о корректности модели и возможности применения описанной методики для исследования движения сложных систем.

Заключение

В работе получены следующие результаты:

1. Предложена методика, которая позволяет упростить исследование движения сложных систем.
2. Выявлены рассогласования решений, полученных с использованием возможностей Matlab/Simulink и предложенного ранее математического описания [9]. Оценены полученные ошибки, и объяснены возможные причины их возникновения.
3. Сделаны выводы о корректности предложенной методики, в процессе проведения исследований показано существенное его упрощение.

4. Полученная система в пакете Matlab/Simulink позволяет проводить моделирование не только кинематических зависимостей, но и динамики, но для оценки качества требуется составление зависимостей, описывающих саму динамику системы, работа над чем в настоящий момент только ведется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство. – М.: Наука, 1971. − 192 с.
2. Хейло С. В. Разработка научных основ создания манипуляционных механизмов параллельной структуры для робототехнических систем предприятий текстильной и легкой промышленности: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: 05.02.13 / Московский Государственный Университет Дизайна и Технологии., Москва, 2014, 292 с.
3. Хейло С. В., Глазунов В. А., Ширинкин М. А., Календарев А. В. Возможные применения механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №5. С. 19-24.
4. Глазунов В. А., Чунихин А. Д. Развитие исследований механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. №3. С.37-43.
5. Глазунов В. А., Левин С. В., Шалюхин К. А. Хаккыоглу М., Во Дин Тунг. Разработка механизмов параллельной структуры с четырьмя степенями свободы и частичной развязкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №5. С. 3-9.
6. Глазунов В. А., Ласточкин А. Б., Шалюхин К. А., Данилин П. О. К анализу и классификации устройств относительного манипулирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. №4. С. 81-85.
7. Хейло С. В., Глазунов В. А. Решение задачи об управлении поступательно-направляющим механизмом параллельной структуры // Справочник. Инженерный журнал. 2013. №10. С. 17-24.
8. Рыбак Л. А. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры. [Электронный ресурс] / Л. А. Рыбак, В. В. Ержуков, А. В. Чичварин. М.: Физматлит, 2011. – 148 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/59592.
9. Лапиков А. Л., Масюк В. М. Анализ решения прямой задачи о положении механизма параллельной структуры с вращательными приводами в кинематических цепях // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9. № 4. С. 52.
10. Лапиков А. Л., Пащенко В. Н. Алгоритм решения прямой задачи кинематики многосекционного манипулятора параллельной структуры // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 12. С. 76-95.
11. SolidWorks Corporation. SolidWorks 2010: Расширенное моделирование деталей. Dassault Systems SolidWorks Corporation, 2009. – 333 с.
12. SolidWorks. Export your SolidWorks® assembly models in a format compatible with Simscape™ Multibody™ software [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://uk.mathworks.com/help/physmod/smlink/solidworks.html (дата обращения 10.09.2017).

Lapikov Anton Leonidovich
Bauman Moscow state technical university
Kaluga branch, Russia, Kaluga
E-mail: anton.lapikov@inbox.ru

Masyuk Vladimir Mihaylovich
Bauman Moscow state technical university
Kaluga branch, Russia, Kaluga
E-mail: masyuk77@mail.ru

Potapov Andrew Alekseyevich
Bauman Moscow state technical university
Kaluga branch, Russia, Kaluga
E-mail: AndrewPotapov@yandex.ru

Fedorov Aleksandr Aleksandrovich
Bauman Moscow state technical university
Kaluga branch, Russia, Kaluga
E-mail: Sf090@yandex.ru

Movement simulation of a two-section parallel mechanism with rotary actuators in kinematic chains

Abstract. The paper discusses the problem of numerical model simulation of a complicated technical system exemplified by a spatial parallel mechanism with rotary kinematic pairs in each chain.

The article brings up a problem of resource intensiveness and research complexity of complicated mechanical systems with the use of classical approaches. To simplify the solution and visualize the results, it is suggested to use the capabilities of modern CAD systems combined with the capabilities of mathematical packages. For estimation of the method's efficiency, the results received during the simulation with the use of the suggested method were compared with analytical results that could be obtained from the previously calculated numerical model; its essential dependences are also given in the paper.

The essential specifications for the model obtained with the use of a CAD system were defined, and the necessary conditions were identified. On the example of a mechanism with parallel kinematics, the results of 3D model translation from a CAD system into a Matlab package were shown, the most frequent problems during such a translation were mentioned and the basic instructions for their solution were given. In the course of the works, a simulation problem of kinematic 3rd class pairs was detected resulting from high computational costs, and an approach for optimization was suggested. An algorithm for solution of this problem was proposed, based on class reduction of a kinematic pair through substitution of the model's units; and mathematical tools for calculation of the information necessary for the correct operation of these units were proposed, which lead to considerable acceleration of simulation and was confirmed experimentally.

With the use of this approach, a possibility for movement simulation of the system was shown. The results obtained with the use of this approach were compared with the results obtained with the use of previously proposed numerical model. The mismatches between the results obtained were analysed, and explanations concerning their character and the reasons for their existence were given. The conclusion on accuracy of suggested method was given.

Keywords: parallel mechanisms; kinematic chain; movement simulation; 3D model; accuracy assessment