

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
COMPUTER-AIDED DESIGN

УДК 004.942; 531.16; 681.516.2

Поступила в редакцию 28.08.2019
Received 28.08.2019

Принята к публикации 18.10.2019
Accepted 18.10.2019

Разработка системы управления учебным роботом-манипулятором параллельной структуры с применением технологии модельно-ориентированного проектирования

Г. А. Прокопович

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
E-mail: rprakapovich@robotics.by*

Аннотация. Описан процесс разработки сложного механического устройства с микроконтроллерным управлением на основе использования технологии модельно-ориентированного проектирования и программных продуктов Mathworks. Объектом разработки являлся робот-манипулятор на базе механизма параллельной структуры с шестью степенями свободы. Для создания микроконтроллерной системы управления манипулятором предложено решение обратной задачи кинематики, работоспособность которого была доказана с помощью динамической компьютерной модели из плоских геометрических примитивов в среде MATLAB. С помощью пакета Simscape Multibody на основе трехмерной модели проектируемого объекта был проведен анализ его физических свойств. Работоспособность аппаратной части системы управления была доказана с помощью пакета Embedded Systems, который также позволил сгенерировать исполнительный код для выбранной микроконтроллерной платы Arduino Mega 2560. Созданный параллельный манипулятор представляет собой действующее электромеханическое устройство с циклическим микроконтроллерным управлением, позволяющим перемещать в пространстве подвижную платформу по заранее заложенным траекториям.

Ключевые слова: имитационное моделирование, параллельный манипулятор, гексапод, обратная задача кинематики, управление, микроконтроллер

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта SERI SFG450 и задания ГПНИ ИК813.

Для цитирования. Прокопович, Г. А. Разработка системы управления учебным роботом-манипулятором параллельной структуры с применением технологии модельно-ориентированного проектирования / Г. А. Прокопович // Информатика. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 99–114.

Development of a control system for an educational robot manipulator of a parallel structure using model-based design

Ryhor A. Prakapovich

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
E-mail: rprakapovich@robotics.by*

Abstract. The development of a complex mechanical device with microcontroller control using of model-based design and Mathworks software products is described. The object was a robotic arm based on a parallel structure mechanism with six degrees of freedom. To create a microcontroller control system for this manipulator,

a solution to the inverse kinematics problem was proposed. The operability of the model was proved using a moving computer model of geometric primitives in MATLAB. Analysis of the physical properties of developing object was carried out on the basis of its three-dimensional model, implemented by Simscape Multibody package and composed of solid-state models. The operability of the control system hardware was proved by Embedded Systems Toolbox, which also allowed to generate an executive code for selected Arduino Mega 2560 microcontroller board. The manipulator is a complete electromechanical device with cyclic microcontroller control, which allows to move the moving platform according to the predefined trajectories.

Keywords: simulation, parallel manipulator, hexapod, kinematics inverse problem, control, microcontroller

Acknowledgements. This work was supported in part by a grant from the SERI SFG450 grant and assignment from GPNI IK813.

For citation. Prakaopovich R. A. Development of a control system for an educational robot manipulator of a parallel structure using model-based design. *Informatics*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 99–114 (in Russian).

Введение. В настоящее время в различных областях науки и техники наблюдается нехватка возможностей традиционных роботов-манипуляторов, от которых требуется прецизионная точность при функционировании в пространствах со сложными связями и ограничениями. К таким условиям можно отнести работу в открытом космосе, хирургические операции на живых тканях, манипулирование микро- и наночастицами, наведение телескопов и антенн, перемещение тяжеловесных грузов по сложной траектории и т. д. Типовой робот-манипулятор представляет собой разомкнутую цепь звеньев механической системы, последовательно соединенных друг с другом с помощью различных кинематических пар (рис. 1, *а*). Как правило, один конец цепи жестко закреплен на станине, а второй содержит исполнительный орган и свободно перемещается в пространстве [1]. Из-за того что в типовых манипуляторах силовые приводные устройства интегрированы в звенья, они имеют низкий показатель грузоподъемности, характеризуются высокими статическими и динамическими ошибками.

Одним из способов преодоления указанных недостатков является использование манипуляторов на основе механизмов параллельной структуры (рис. 1, *б*). Параллельный манипулятор (ПМ) классифицируется как сложный пространственный механизм, состоящий из подвижной (платформа) и неподвижной (основа) жестких рам, соединенных минимум двумя параллельными кинематическими цепями (опорами) [2]. Каждая кинематическая цепь ПМ включает основу, подвижные звенья и платформу, соединенные между собой соответствующими шарнирами. Перемещение платформы относительно основания достигается благодаря синхронному и согласованному изменению длин опор.

Благодаря своей уникальной кинематике ПМ отличаются от последовательных манипуляторов лучшими динамическими свойствами, более высокой точностью и повторяемостью [3]. Например, перспективным является применение роботов-манипуляторов на основе механизмов параллельной структуры для механической обработки изделий сложной формы, инспекции и ремонта обшивки космических кораблей, проведения подводных исследований, контроля трубопроводов атомных электростанций, в авиа- и наземных тренажерах, ортопедической хирургии, мобильной робототехнике и др. [4–6].

Несмотря на то что ПМ создаются как универсальные устройства, которые могут использоваться в самых разных ситуациях, ввиду их технических и экономических особенностей они проектируются с учетом конкретных задач и функций. Однако анализ и синтез кинематики, геометрии рабочего пространства и систем управления ПМ являются достаточно сложными процессами. Трудности при построении моделей указанных роботов обусловлены взаимным влиянием параллельных опор. Это приводит к ограничению степеней подвижности и сложности задания движений манипулятора в обобщенных координатах, а также появлению анизотропии и неоднородности его динамических, упругих и скоростных свойств [5].

Учитывая изложенное выше, а также востребованность и возрастающий коммерческий интерес к ПМ в различных отраслях, актуальность приобретает задача разработки эффективных методик их проектирования и расчета.

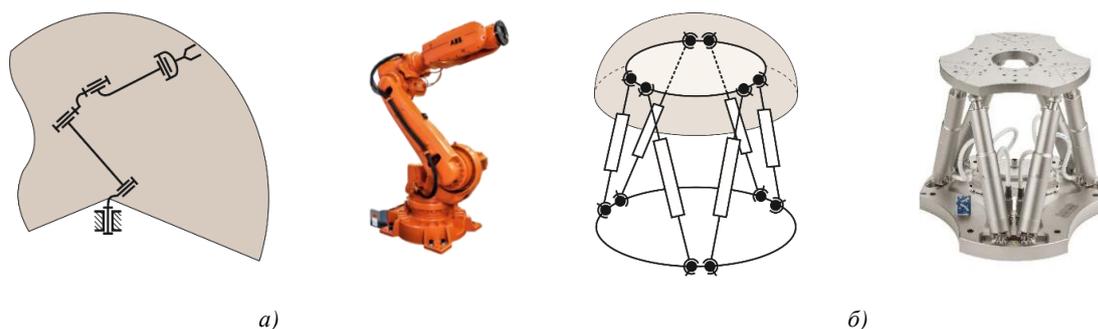


Рис. 1. Сравнение кинематических структур манипуляторов: а) разомкнутая; б) замкнутая

Объект разработки. Одними из самых известных и востребованных манипуляторов параллельной структуры являются манипуляторы, выполненные в виде платформы Гю – Стюарта [3–5, 7]. Как правило, подобные платформы называются гексаподами, которые обладают тремя поступательными и тремя вращательными степенями свободы.

Наиболее распространенными компоновками гексаподов являются октаэдр (рис. 2, а) и усеченная шестигранный пирамида (рис. 2, б). У таких гексаподов число шарнирных узлов, к которым крепятся концы опор, на платформе и основании совпадают. Благодаря большой жесткости компоновка в виде октаэдра широко используется в металлорежущих станках-гексаподах и различных подъемных механизмах. Пирамидальная компоновка из-за недостаточной жесткости применяется в менее ответственных установках, в которых изготовление сложных составных шарниров неоправдано. Однако она широко используется при расчетах и анализе кинематических и динамических характеристик механизмов параллельной структуры. Вместе с тем на практике можно встретить и промежуточный вариант компоновки (рис. 2, в).

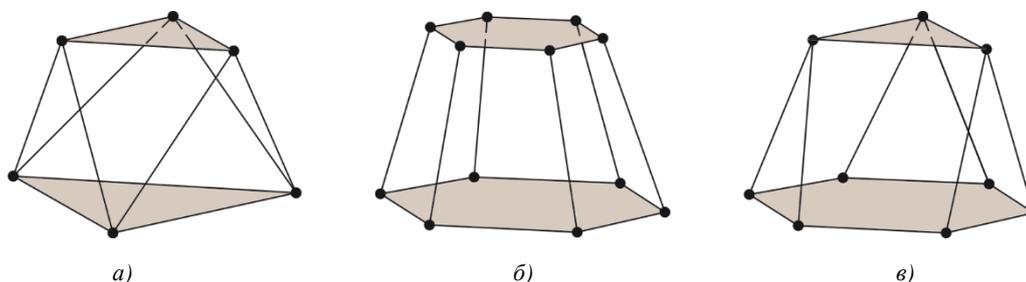


Рис. 2. Варианты компоновки гексаподов: а) октаэдр; б) усеченная пирамида; в) смешанная пирамида

В качестве актуаторов используются как линейные, так и угловые силовые приводы. Большинство разработанных гексаподов предназначены для удержания больших нагрузок. В связи с этим их геометрия проектируется таким образом, чтобы опоры работали на сжатие и растяжение [7]. Поэтому чаще всего встречаются гексаподы с гидравлическими, шариковыми и даже пневматическими линейными приводами, которые требуют наличия высокоточных датчиков линейного перемещения. Это также влияет на сложность и конечную цену устройства. Помимо высокой цены гексаподы с линейными приводами имеют достаточно большие габариты. Учитывая все вышперечисленное, в образовательных целях чаще всего используют гексаподы с угловыми приводами на основе стандартных серводвигателей, содержащих в своем корпусе датчики угла поворота. Таким образом, когда перед авторами была поставлена задача спроектировать недорогой учебный ПМ, они использовали второй принцип. Особенностью нового манипулятора являлось то, что его необходимо было создать на элементной базе уже известного конструктора RoboCake (URL: http://uiip.bas-net.by/structure/l_rts/lit_Prakarovich.php). Образовательный робототехнический конструктор RoboCake представляет собой реконфигурируемый корпус в виде шестигранной призмы, содержащий мно-

жество универсальных технологических отверстий. С помощью таких отверстий можно устанавливать и закреплять большое количество современных сенсоров и датчиков, а также микропроцессорных и микроконтроллерных вычислительных устройств. При этом необходимо было задействовать как можно больше уже имеющихся элементов указанного конструктора и реализовать программное обеспечение таким образом, чтобы система управления ПМ была максимально универсальной и масштабируемой под различные образовательные и практические задачи.

Учитывая геометрические и технические особенности робототехнического конструктора RoboCake, было предложено взять за основу компоновку гексапода, изображенного на рис. 2, в. Таким образом, полученный ПМ состоит из нижнего неподвижного основания, которое представляет собой шестигранную призму, и верхней подвижной платформы, представляющей собой плоскую крышку для корпуса из того же набора (рис. 3).

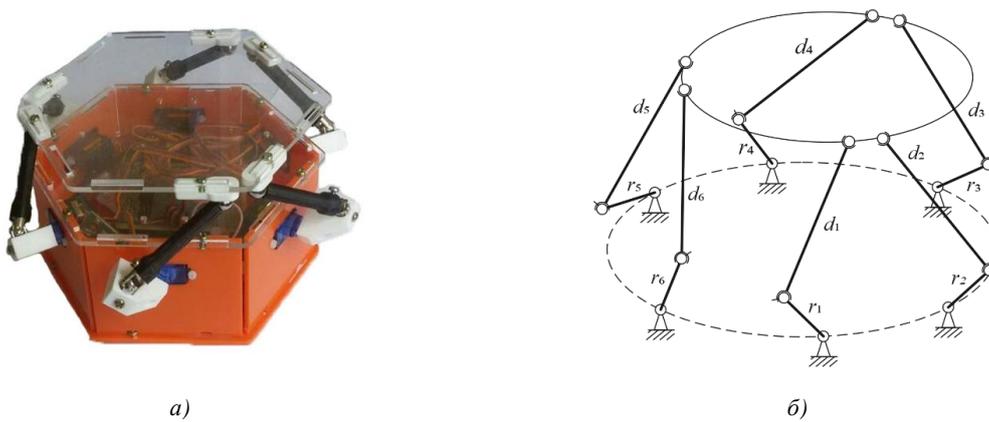


Рис. 3. Внешний вид и кинематическая схема предложенного ПМ

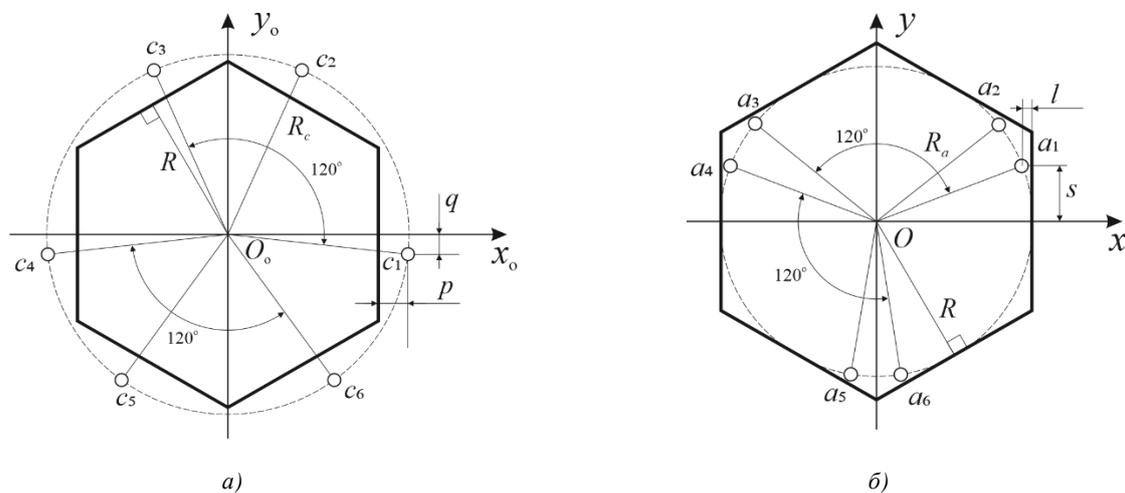


Рис. 4. Расположение шарниров: а) на основании ПМ; б) на платформе ПМ

Платформа соединяется с основанием шестью подвижными опорами, каждая из которых представляет собой кривошипно-шатунную структуру (рис. 3, б). Обозначим через a_i сферические шарниры на подвижной платформе (рис. 4, б); b_i – универсальные (карданные) шарниры между кривошипами и шатунами; c_i – поворотные шарниры на основании (рис. 4, а); O_0 – центр основания; O – центр платформы; R – радиус окружности, вписанной в правильный шестиугольник крышки корпуса; R_a – расстояние от центра платформы до расположенных на ней шарниров; R_c – расстояние от центра основания до расположенных на нем шарниров; r_i – длины нижних стержней, называемых кривошипами; d_i – длины стержней, называемых

шатунами и присоединенных к кривошипам через шарниры b_i соответственно, где $i = \overline{1,6}$. Кривошипы приводятся во вращение микросерводвигателями, которые также входят в комплект конструктора. Шарниры основания и платформы располагаются попарно и на одинаковом расстоянии от их центров, угол между парами шарниров $c_1 - c_3$, $c_4 - c_6$, $a_1 - a_3$, $a_4 - a_6$ и т. д. составляет 120° (рис. 4). При этом плоскости вращения кривошипов параллельны соответствующим боковым граням корпуса ПМ, к которым крепятся их серводвигатели.

Таким образом, помимо стандартных деталей описанного конструктора, на 3D-принтере дополнительно были изготовлены шатуны, кривошипы и крепления для сферических шарниров, устанавливаемых в пазы на платформе. После того как этап сборки механической части был полностью завершен, требовалось выполнить наиболее ответственную часть всего проекта – разработать и создать программно-аппаратный комплекс системы управления описанным роботом. Для этого необходимо было выполнить следующие задачи: построить математическую модель, описывающую предложенную выше механическую систему; на основе построенной модели решить обратную задачу кинематики (ОЗК) и произвести необходимые расчеты для определения углов поворота кривошипов; построить экспериментальную установку для верификации полученной математической модели и проверки достоверности произведенных вычислений.

Парадигма модельно-ориентированного проектирования. Современные экономические реалии и жесткая конкуренция заставляют производителей высокотехнологичных товаров пересматривать классические модели итеративного проектирования (рис. 5, а), особенно когда в него вовлечены несколько коллективов. Основными недостатками спиральной парадигмы проектирования, до сих пор применяющейся на большинстве предприятий, является использование:

- технической документации в текстовом виде, которая не позволяет в полной мере составить достаточно глубокие требования и спецификации к проектируемому объекту;
- раннего прототипирования, результаты которого, как правило, являются сырыми, а изготовление самих прототипов – сложным и неоправданно дорогим;
- разнородных программных средств для реализации системы управления, которые ввиду человеческого фактора делают весь процесс ненадежным.

Поэтому традиционное тестирование на конечном этапе проверки всей системы приводит к обнаружению ошибок, когда что-то кардинально менять становится уже слишком поздно и дорого.

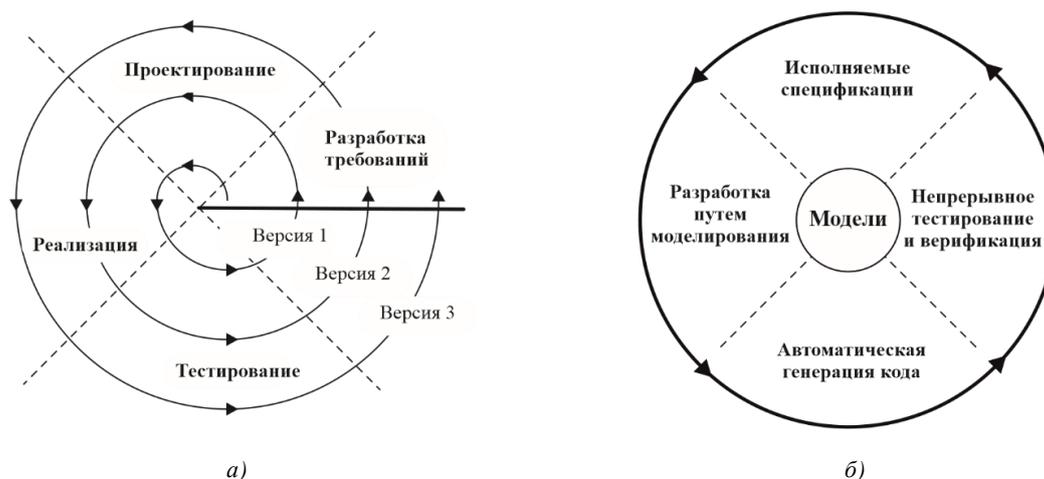


Рис. 5. Различные парадигмы проектирования: а) спиральная; б) модельно-ориентированная

Одним из современных способов организации процессов проектирования сложных технических систем является использование парадигмы модельно-ориентированного проектирования (МОП) [8, 9]. Суть МОП заключается в создании полного технического описания только на базе

3D-моделей и связанных с ними элементов данных (рис. 5, б). Таким образом, МОП представляет собой процесс проектирования, который опирается на использование наглядной имитационной модели будущего изделия. При этом имитационная модель является основным носителем информации о концепции, особенностях конструкции и конечной реализации проектируемого изделия. Она используется на протяжении всех стадий процесса проектирования: от исследования и конструирования до практической реализации и проведения приемо-сдаточных испытаний. Покомпонентное моделирование позволяет определять входные и выходные параметры систем, моделировать изделия на требуемом уровне детализации и реализовывать их автоматическое документирование. В результате моделируемые спецификации обеспечивают отсутствие двусмысленности и тесное взаимодействие участвующих команд разработчиков.

Относительно программно реализованной инструментальной среды рабочая имитационная модель является набором типов данных, в которую вносятся конструкторские изменения по мере ее уточнения и детализации. При этом на каждом этапе модель гармонично обновляется и эволюционирует. МОП гарантирует полное прослеживание состава ее параметров и другой конструкторской информации на всех этапах проектирования (URL: <https://matlab.ru/solutions/mbd/mbd>), что позволяет разным подразделениям (конструкторскому, проектному, аналитическому, производственному, снабжения и контроля качества) получать доступ к общему полному цифровому определению изделия.

Основными этапами реализации МОП являются:

- построение аналитической и имитационной моделей объекта управления;
- анализ объекта и построение необходимого регулятора;
- совместное моделирование объекта и его системы управления;
- совместная работа модели объекта с реальной системой управления и наоборот;
- реализация системы управления на реальном объекте.

Одним из лидеров по разработке программно-аппаратного обеспечения для реализации парадигмы МОП является компания Mathworks. Благодаря тому что данная компания большое внимание уделяет образовательному и научному направлениям, ее основные продукты, такие как MATLAB и Simulink, хорошо известны и весьма доступны для большинства высших учебных заведений. Учитывая вышеуказанные требования, было решено реализовать процесс разработки учебного ПМ именно на основе продуктов Mathworks.

Математическая модель. Построение аналитической модели выбранного объекта заключается в основном в решении его ОЗК, которая для предложенного ПМ с шестью степенями свободы на базе кривошипно-шатунного механизма формулируется следующим образом: необходимо определить углы поворота кривошипов, позволяющих достичь заранее заданное положение верхней платформы в пространстве.

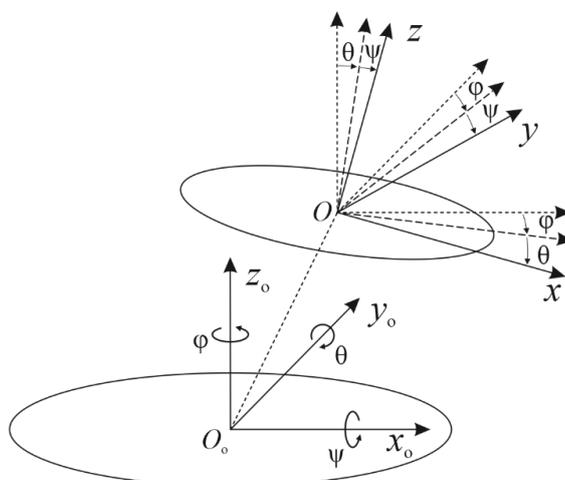


Рис. 6. Принятые системы координат

Свяжем с неподвижной платформой абсолютную систему координат $O_0x_0y_0z_0$. Точку отсчета совместим с центром платформы – точкой O_0 , ось O_0x_0 проведем через центры первой и четвертой боковых граней корпуса ПМ, ось O_0z_0 направим перпендикулярно плоскости основания, а ось O_0y_0 расположим так, чтобы получилась правая система координат (рис. 6). Аналогичным образом построим локальную систему координат $Oxyz$, связанную с подвижной платформой в точке O .

Следовательно, начало координат платформы O будет определяться с помощью трех поступательных перемещений Δx , Δy , Δz относительно основания. Ориентацию подвижной платформы по отношению к неподвижному основанию будем определять с помощью системы углов Эйлера, основанной на углах крена, тангажа и рыскания. Данная система широко используется в авиации при описании движения аппаратов относительно неподвижной глобальной системы отсчета, связанной с поверхностью Земли. Аналогичным образом в процессе выполнения ПМ различных технологических операций происходит постоянное перемещение платформы относительно неподвижного основания, к которому привязана глобальная система отсчета $O_0x_0y_0z_0$. Указанные углы соответствуют следующей последовательности поворотов: поворот на угол ψ вокруг оси O_0x_0 (рысканье), поворот на угол θ вокруг оси O_0y_0 (тангаж) и поворот на угол φ вокруг оси O_0z_0 (крен). Тогда результирующая матрица вращения подвижной платформы по отношению к основанию определяется формулой

$$R_{\psi,\theta,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & \cos\varphi\sin\psi\sin\theta - \sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi\sin\theta\cos\psi - \sin\varphi\sin\psi \\ \sin\varphi\cos\theta & \sin\varphi\sin\psi\sin\theta + \cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi\sin\theta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Геометрическое отношение между подвижной платформой, обладающей шестью степенями свободы, и неподвижным основанием представим с помощью матрицы однородных преобразований

$$T_{6\text{DOF}} = \begin{bmatrix} & \Delta x \\ R_{\psi,\theta,\varphi} & \Delta y \\ & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $R_{\psi,\theta,\varphi}$ – матрица вращения (1) размером 3×3 ; $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ – вектор-столбец координат точки O в абсолютной системе отсчета; вектор-строка $[0, 0, 0]$ задает преобразование перспективы; четвертый диагональный элемент является глобальным масштабирующим множителем, в нашем случае – единицей. Определим новое положение i -го шарнира подвижной платформы в абсолютной системе координат в виде вектора-столбца \mathbf{a}'_i относительно локальных координат \mathbf{a}_i платформы:

$$\mathbf{a}'_i = [x_i \quad y_i \quad z_i \quad 1]^T = T_{6\text{DOF}} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

в котором четвертую координату, равную единице, далее будем игнорировать.

Таким образом, формулы преобразований (1)–(3) задают координаты подвижной платформы в абсолютной системе координат при ее поступательном смещении на значения Δx , Δy , Δz и вращении вокруг трех осей на углы φ , θ , ψ .

Найдем соответствующие углы поворота кривошипов. Для этого рассмотрим плоскость $O'_0y'_0z'_0$, которая была получена путем параллельного переноса плоскости $O_0y_0z_0$ вдоль оси O_0x_0 из точки O_0 в точку O'_0 на расстояние $(R+p)$. В результате точка c_1 принадлежит новой

плоскости (рис. 7). Отсюда следует, что вращение первого кривошипа происходит в плоскости $O'_0y'_0z'_0$. На рис. 7 приняты следующие обозначения: точка A – шарнир a_1 ; точка B – шарнир b_1 ; точка C – шарнир c_1 ; точка E – основание перпендикуляра, опущенного из точки A на плоскость $O'_0y'_0z'_0$; точка D – основание перпендикуляра, опущенного из точки E на ось $O'_0y'_0$. Таким образом, отрезок $BC = r$ является длиной кривошипа, $AB = d$ – длиной шатуна, а искомым является угол α_3 поворота кривошипа BC . Угол α_3 состоит из суммы двух других смежных углов α_1 и α_2 , значения которых можно определить с помощью теоремы косинусов. Для этого найдем недостающие значения остальных отрезков из $\triangle BCE$ и $\triangle DCE$.

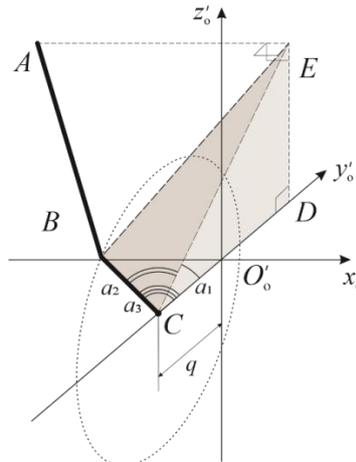


Рис. 7. Кривошип

Отрезки AE , CD и DE служат проекциями вектора \overline{AC} на оси $O'_0x'_0$, $O'_0y'_0$ и $O'_0z'_0$ соответственно. Так как $c_1 = C$, $C \in O'_0y'_0z'_0$, то $[AE, CD, DE]^T = abs(\mathbf{a}'_1 - \mathbf{c}_1)$. Тогда длины указанных отрезков для всех шести кривошипов будут определены путем проецирования векторов \overline{AC}_i на соответствующие плоскости, полученные путем вращения плоскости $O'_0y'_0z'_0$ вокруг оси O_0z_0 на углы, кратные 60° . Следовательно, отрезки AE , CD и DE для всех шести кривошипов будут находиться следующим образом:

$$\begin{bmatrix} AE_i \\ CD_i \\ DE_i \end{bmatrix} = abs(\mathbf{R}_i^T \cdot \overline{AC}_i) = abs \left(\begin{bmatrix} \cos(\pi/3 \cdot (i-1)) & -\sin(\pi/3 \cdot (i-1)) & 0 \\ \sin(\pi/3 \cdot (i-1)) & \cos(\pi/3 \cdot (i-1)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \cdot [\mathbf{a}'_i - \mathbf{c}_i] \right), \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{0,0,\varphi}$ – матрица поворота вокруг оси O_0z_0 на угол φ , которую требуется транспонировать в связи с необходимостью реализовать обратное преобразование из глобальной системы отсчета в локальную.

Учитывая показанные на рис. 4 конструктивные особенности проектируемого ПМ, найдем координаты шарниров на неподвижном основании в абсолютной системе координат в виде соответствующих векторов-столбцов:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_1 &= (R + p, -q, 0)^T, \\ \mathbf{c}_2 &= ((R + p)\cos(\pi/3) - q\sin(\pi/3), (R + p)\sin(\pi/3) + q\cos(\pi/3), 0)^T, \\ \mathbf{c}_3 &= ((R + p)\cos(2\pi/3) + q\sin(2\pi/3), (R + p)\sin(2\pi/3) - q\cos(2\pi/3), 0)^T, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_4 &= (-(R+p), -q, 0)^T, \\ \mathbf{c}_5 &= ((R+p)\cos(4\pi/3) + q\sin(4\pi/3), (R+p)\sin(4\pi/3) - q\cos(4\pi/3), 0)^T, \\ \mathbf{c}_6 &= ((R+p)\cos(5\pi/3) - q\sin(5\pi/3), (R+p)\sin(5\pi/3) + q\cos(5\pi/3), 0)^T. \end{aligned} \quad (5)$$

Координаты шарниров на подвижной платформе в локальной системе координат:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= (R-l, s, 0)^T, \\ \mathbf{a}_2 &= ((R-l)\cos(\pi/3) + s\sin(\pi/3), (R-l)\sin(\pi/3) - s\cos(\pi/3), 0)^T, \\ \mathbf{a}_3 &= ((R-l)\cos(2\pi/3) - s\sin(2\pi/3), (R-l)\sin(2\pi/3) + s\cos(2\pi/3), 0)^T, \\ \mathbf{a}_4 &= (-(R-l), s, 0)^T, \\ \mathbf{a}_5 &= ((R-l)\cos(4\pi/3) - s\sin(4\pi/3), (R-l)\sin(4\pi/3) + s\cos(4\pi/3), 0)^T, \\ \mathbf{a}_6 &= ((R-l)\cos(5\pi/3) + s\sin(5\pi/3), (R-l)\sin(5\pi/3) - s\cos(5\pi/3), 0)^T. \end{aligned} \quad (6)$$

Отрезки EB и EC являются соответственно проекциями отрезков AB и AC на плоскость $O'_0y'_0z'_0$, поэтому значения их длин находятся следующим образом:

$$EB = \sqrt{AB^2 - AE^2}; \quad (7)$$

$$EC = \sqrt{CD^2 - DE^2}. \quad (8)$$

Как уже отмечалось выше, чтобы найти углы α_1 и α_2 , можно воспользоваться теоремой косинусов:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{CD^2 + EC^2 - DE^2}{2CD \cdot EC}\right); \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{EC^2 + BC^2 - EB^2}{2EC \cdot BC}\right). \quad (10)$$

В связи с тем что нечетные опоры по отношению к четным расположены зеркально относительно оси O_0z_0 , искомый угол находится по правилу

$$\alpha_3 = \begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 & \text{для } i = 1, 3, 5; \\ \pi - \alpha_1 - \alpha_2 & \text{для } i = 2, 4, 6. \end{cases} \quad (11)$$

Алгоритм решения ОЗК для разрабатываемого ПМ будет иметь следующий вид:

- 1) по формулам (5) рассчитать значения координат \mathbf{c}_i шарниров на основании;
- 2) по формулам (6) рассчитать значения координат \mathbf{a}_i шарниров на платформе;
- 3) задать требуемые значения Δx , Δy , Δz линейного перемещения по трем осям и положение платформы относительно основания с помощью углов φ , θ , ψ ;
- 4) вычислить значения элементов матрицы однородных преобразований по формуле (2);
- 5) по формуле (3) определить новые координаты шарниров платформы в глобальной системе отсчета;
- 6) по формулам (4), (7)–(10) найти вспомогательные углы α_1 и α_2 для всех шести опор;

7) в зависимости от номера опоры по формуле (10) найти искомые углы поворота всех шести кривошипов.

На основе приведенного алгоритма в интерактивной среде программирования MATLAB был разработан скрипт, с помощью которого на примере плоских геометрических примитивов был промоделирован основной принцип функционирования кинематической схемы разрабатываемого ПМ (рис. 8, а). Размеры основных элементов ПМ были взяты из реального образца (см. рис. 3, а): $R = 71,492$, $r = 17,5$, $d = 58$, $s = 30$, $p = 25$, $q = 5,79$, $l = 1,5$ мм. На рис. 8 голубой шестиугольник находится в плоскости $O_0x_0y_0$ глобальной системы отсчета, а красный указывает на верхнюю границу шестиугольного корпуса самого ПМ.

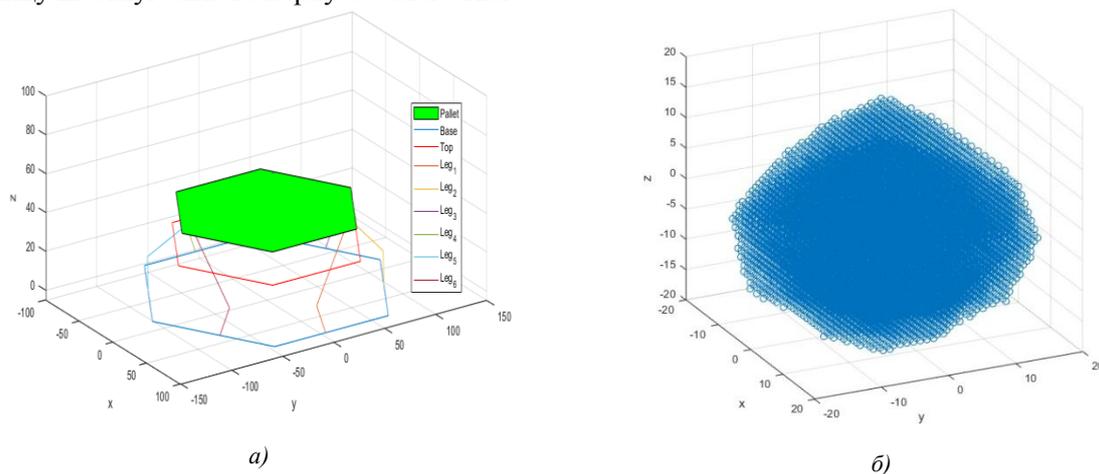


Рис. 8. Простейшая модель кинематической схемы разрабатываемого ПМ

Благодаря реализованной модели были подтверждены правильность и работоспособность предложенного решения ОЗК для разрабатываемого ПМ. Был проведен ряд численных экспериментов, с помощью которых была определена рабочая зона функционирования и перемещения центра подвижной платформы (рис. 8, б), причем объем полученного пространства составил $0,64 \text{ дм}^3$. Предельные значения перемещения платформы по каждой из шести координат составили: $\psi \in [-0,20; 0,20]$, $\theta \in [-0,17; 0,17]$, $\phi \in [-0,20; 0,20]$, $x \in [-15,6; 15,6]$, $y \in [-15,1; 19,6]$ и $z \in [-17,8; 17,9]$. Углы указаны в радианах, а линейные перемещения – в миллиметрах. Все повороты и линейные перемещения по осям Ox и Oy производились при стационарном положении платформы вдоль оси Oz на высоте $41,19$ мм в глобальной системе отсчета. На рис. 9 показана сильная нелинейная зависимость между движением платформы и соответствующими изменениями углов поворота кривошипов, а также значения изменения скоростей углов поворота всех шести кривошипов, необходимых для линейного циклического передвижения платформы всего лишь по одной оси O_0x_0 со скоростью 30 мм/с .

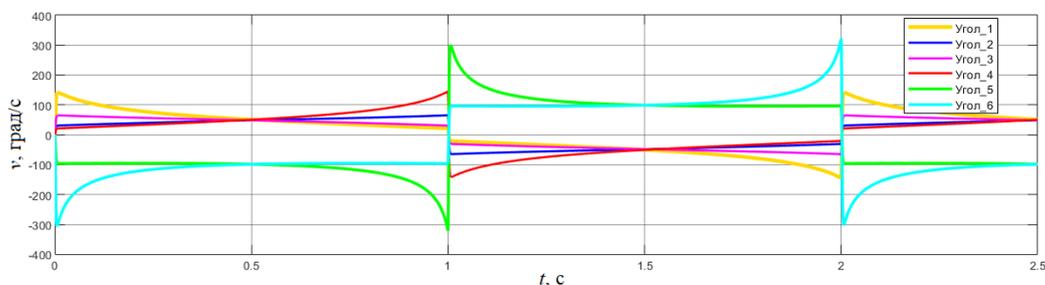


Рис. 9. Значения скоростей вращения кривошипов в процессе линейного перемещения платформы

Моделирование кинематики ПМ позволило получить первые характеристики его рабочей зоны. Однако полученные результаты не учитывали массогабаритные, инертные и другие физические параметры проектируемого ПМ, так как созданная модель состояла из отрезков

и плоских фигур. В связи с этим следующим этапом в реализации технологии модельно-ориентированного проектирования является создание полноценной имитационной модели ПМ.

Эксперименты с имитационной моделью. Для имитационного моделирования кинематики и динамики проектируемого ПМ была использована библиотека Simscape Multibody, которая предназначена для трехмерной симуляции многотельных механических систем. Благодаря Simscape Multibody можно моделировать многотельные системы при помощи блоков, которые являются представлениями тел, различных типов соединений, ограничительных связей и элементов силы.

Твердотельные тела могут быть представлены как в виде геометрических примитивов (сферы, цилиндра, параллелепипеда, тел вращения и др.), так и в виде отдельных CAD-моделей в форматах *.stl* и *.step*. Физические свойства тел определяются с точки зрения их массы, инерции и точек соединения. Тела могут соединяться при помощи типовых связей (линейных, поворотных, винтовых и т. д.), также на них могут накладываться различные ограничения. На основе построенной из блоков функциональной схемы и указанных в блоках параметров библиотека Simscape Multibody формулирует и решает уравнения движения для всей механической системы. Огромным ее преимуществом является то, что система Simulink позволяет подключать через соединения блоков виртуальные приводные механизмы из других своих библиотек. В результате элементы построенной механической системы могут перемещаться согласно сформированной схеме взаимодействия тел и ограничений.

На рис. 10 изображена схема построения ПМ с помощью библиотеки Simscape Multibody, на которой в качестве примера подробно указаны элементы одной из шести параллельных кинематических цепей – первой опоры:

- а) горизонтальный формообразующий элемент конструктора (основание) в виде правильного шестиугольника, по краям которого расположены фиксирующие продольные пазы;
- б) боковые стенки с технологическими отверстиями – креплениями для серводвигателей;
- в) серводвигатели;
- г) управляемые поворотные шарниры, имитирующие работу серводвигателей;
- д) кривошпы;
- е) карданные шарниры;
- ж) шатуны;
- з) сферические шарниры с креплениями;
- и) верхняя крышка (платформа) в виде правильного шестиугольника с пазами для магнитов.

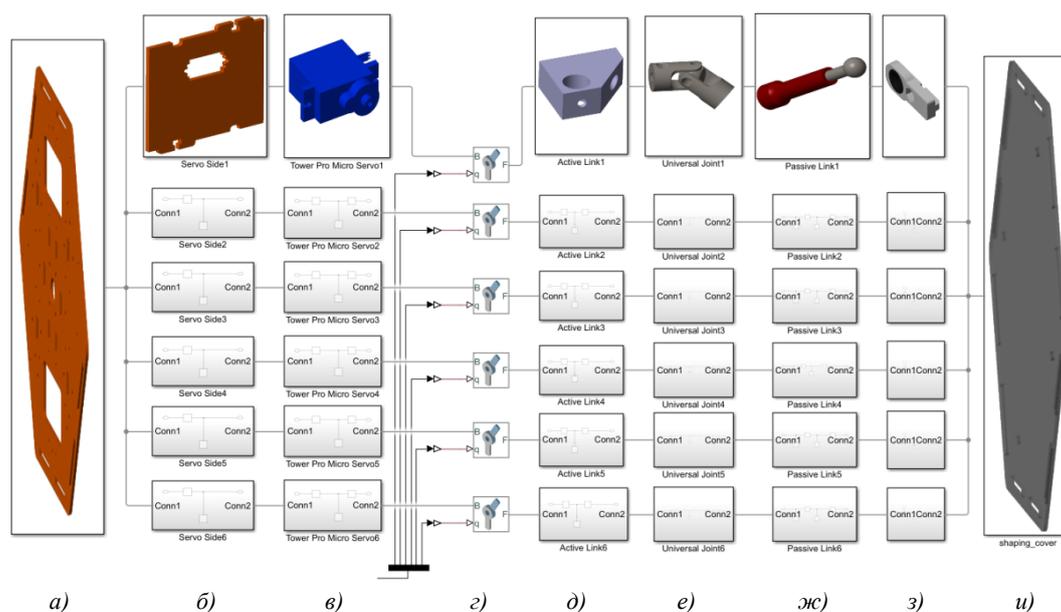


Рис. 10. Иерархия функциональных Simulink-блоков для построения механической модели разрабатываемого ПМ

Для удобства линии управляющих сигналов, используемых для задания углов вращения валов микросерводвигателей, сведены в единую шину. Библиотека Simscape Multibody позволяет автоматически генерировать 3D-анимацию для визуализации динамики полученной системы, моментальный снимок которой изображен на рис. 11, а демонстрационный видеоролик можно найти по адресу <https://www.youtube.com/watch?v=3dP0g6iG9Ik>. При создании виртуального корпуса ПМ с помощью Simulink-блоков одним из самых сложных процессов была сборка карданных шарниров, так как каждый из них состоял из трех отдельных элементов: двух вилок и крестовины. При этом требовался дополнительный геометрический расчет углов наклона крестовин четных и нечетных карданных шарниров, для того чтобы во время начала процесса моделирования центр подвижной платформы ПМ находился в стационарном положении.

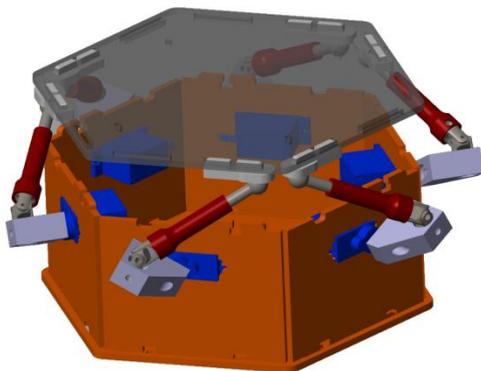


Рис. 11. 3D-модель ПМ в виртуальной среде

Значения инерции отдельных элементов вычислялись автоматически с помощью библиотеки Simscape Multibody на основе геометрических параметров, содержащихся в соответствующих САД-моделях, и предварительного ручного ввода значений массы элементов конструктора, полученных путем их взвешивания. Таким образом, первый этап реализации МОП был полностью завершен. Второй этап заключался в проведении анализа физических свойств полученного объекта.

Механическое вращение кривошипов реализовывалось с помощью микросерводвигателей Tower Pro SG90, которые имеют следующие характеристики: габариты – $23 \times 12 \times 29$ мм, вес – 9–14,5 г (в зависимости от количества металлических шестерен), угол поворота выходного вала – 180° , напряжение – 4,8–6 В, вращающий момент – 1,8–2,5 кг·см (в зависимости от напряжения), скорость вращения выходного вала – 600 град/с.

Как было показано в предыдущем разделе, в разрабатываемой конструкции ПМ имеется сильная нелинейная зависимость между скоростью перемещения платформы и скоростью вращения валов микросерводвигателей. С целью разработки качественной системы управления ПМ требуется определить предельные значения его ключевых характеристик. К ним относятся максимально допустимые полезная нагрузка и скорость передвижения платформы. На рис. 12 показана схема проведения эксперимента, в которой использовались следующие элементы:

- а) управляющие сигналы в виде синусоид с амплитудами:
 - 0,1 рад для углов ψ и θ ;
 - 0,08 рад для угла φ ;
 - 6 мм для перемещения вдоль осей x и y ;
 - 3 мм для оси z ;
- б) данные о геометрии ПМ для решения описанного в предыдущем разделе ОЗК:
 - начальные координаты шарниров на подвижной платформе в глобальной системе отсчета \mathbf{a}'_i , которые были записаны в массив AL;
 - радиус окружности, вписанной в правильный шестиугольник корпуса R ;
 - длина кривошипов r ;
 - длина шатунов d ;

– начальный угол поворота шатунов α_3 для выставления подвижной платформы в стационарное положение;

в) программный модуль расчета ОЗК по предложенному выше способу, реализованный в виде m -функции;

з) виртуальная модель ПМ, реализующая его кинематику и представленная в виде Simulink-блоков на рис. 10;

д) виртуальные осциллографы, на дисплее которых выводятся значения скорости v и ускорения a центра подвижной платформы, а также угловая скорость ω и вращающий момент M , возникающие на валах соответствующих микросерводвигателей.

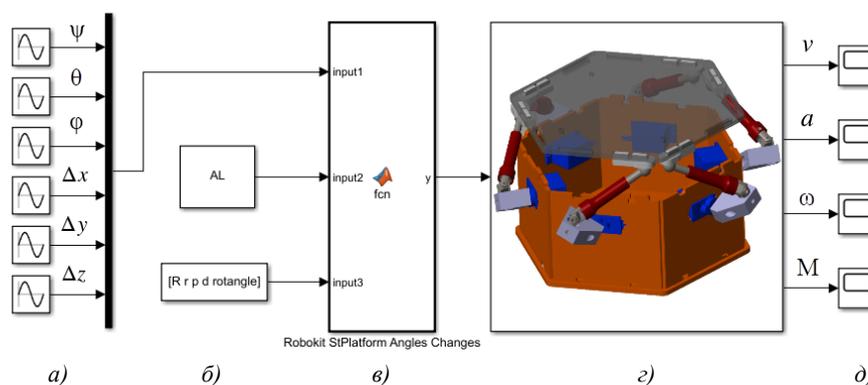


Рис. 12. Модель для проведения экспериментов с виртуальным ПМ в среде Simulink

Таким образом, для получения экспериментальных данных в модельной среде была реализована система управления ПМ, что соответствует уже третьему этапу реализации МОП. Полученная взаимная интеграция указанных этапов МОП лишний раз подтверждает целостность и прозрачность выбранного подхода. На основе разработанной имитационной модели был проведен ряд экспериментов, в которых при постепенно увеличивающихся массе полезной нагрузки и скорости перемещения платформы замерялись вращающий момент M и скорость вращения v выходных валов виртуальных микросерводвигателей. Замеры осуществлялись при помощи сенсорных свойств шарнирных примитивов, которые позволяют получить с идеальной точностью значения положения, скорости, ускорения и силовых параметров ведомого фрейма относительно базового фрейма по трем осям. Полученные значения вращающих моментов (рис. 13, а) и скоростей вращения (рис. 13, б) выходных валов микросерводвигателей остаются в пределах, допустимых их производителями. На основе моделирования были определены максимально допустимые значения искомых управляющих параметров проектируемого ПМ: линейная скорость – не более 50 мм/с, ускорение – не более 0,3 g, полезная нагрузка – не более 150 г.

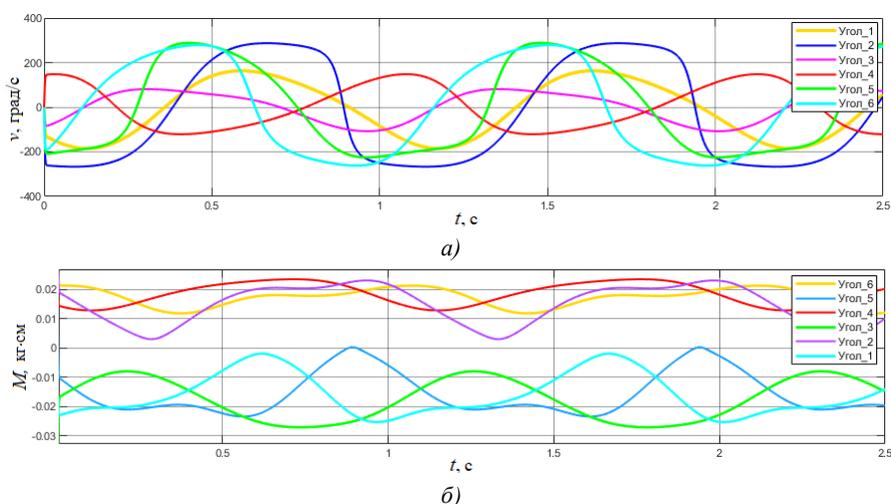


Рис. 13. Значения вращающих моментов (а) и скоростей вращения (б) выходных валов микросерводвигателей

На рис. 13 видно, что при указанных нагрузках требуемый вращающий момент максимально приблизился к допустимым значениям, а по скорости вращения валов еще остается запас.

На основе полученной модели ПМ также был проведен ряд численных экспериментов по определению точности перемещения его подвижной платформы. Для этого после блока решения ОЗК в нее принудительно вводился шум, соответствующий допустимым значениям ошибок поворота валов микросерводвигателей. Амплитуда шума основывалась на документации производителя и составляла 1° . В результате было получено, что при добавлении шума на все микросерводвигатели среднеквадратичная ошибка составляет всего 9,9 мкм, а при добавлении указанного шума на выборочные микросерводвигатели ошибка будет больше: 24,7 мкм для одного микросерводвигателя и 30,0 мкм для трех. Это доказывает, что благодаря уникальной кинематике ПМ ошибки, возникающие в их приводах, не накапливаются, а, наоборот, нивелируются. Таким образом, по сравнению с классическими манипуляторами разомкнутой структуры ПМ имеют гораздо большую точность и жесткость.

Тестирование разработанной системы управления. После выполнения первых трех этапов МОП требовалось решить, на какой аппаратной платформе будет реализована система управления ПМ. Так как разрабатываемый ПМ предназначен прежде всего для применения в образовательных целях, было предложено воспользоваться хорошо известной линейкой микропроцессорных плат семейства Arduino. В связи с наличием цифровых и аналоговых портов ввода-вывода и трех основных интерфейсов (UART, SPI, I2C) микроконтроллерные платы Arduino обладают возможностью работы с большим количеством датчиков и сенсоров, а также достаточно широким набором плат расширения. Благодаря своему широкому распространению и использованию в образовательной сфере платы Arduino были включены в список поддерживаемых аппаратных платформ MATLAB и Simulink в виде Embedded Systems Toolbox. Это позволяет эффективно моделировать, программировать и верифицировать достаточно сложные микропроцессорные системы управления, применяя все имеющееся многообразие функций и алгоритмов указанных программных сред.

На рис. 14 показан принцип проведения эксперимента по управлению реальным ПМ. Программная модель системы управления (рис. 14, а), запущенная на компьютере в среде Simulink (рис. 14, б), с помощью указанного выше вспомогательного пакета Simulink Support Package for Arduino Hardware генерирует и загружает управляющий код в микропроцессорную плату Arduino Mega 2560 по USB-интерфейсу (рис. 14, в). Данный пакет позволяет пользователю получить доступ ко всем имеющимся в указанной плате цифровым и аналоговым портам ввода-вывода, интерфейсам и т. д.

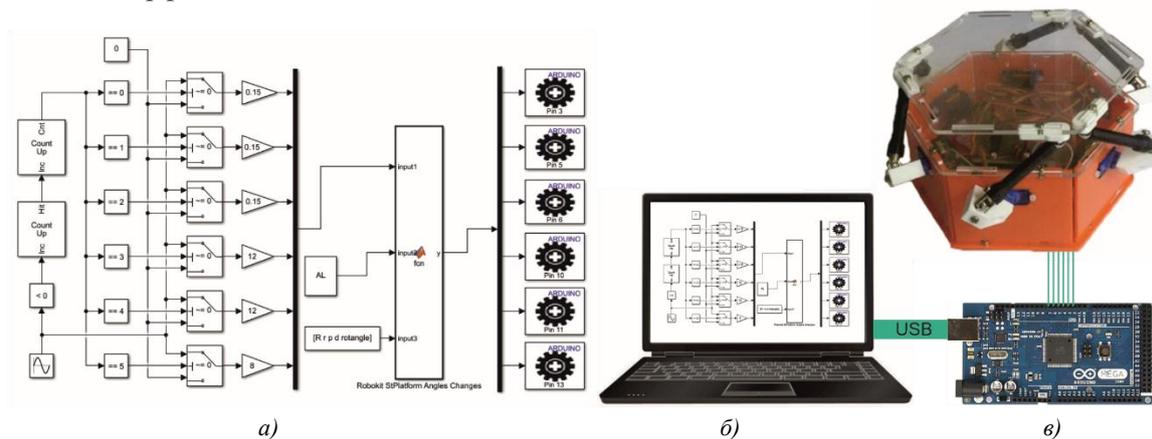


Рис. 14. Схема проведения эксперимента с реальным объектом управления

На основе полученных команд микропроцессорная плата Arduino сгенерировала на цифровых портах сигналы широтно-импульсной модуляции, которые были соединены со входами соответствующих микросерводвигателей, и платформа ПМ перемещалась по требуемой траектории. Указанный эксперимент продемонстрировал работоспособность проектируемого ПМ, синхронная работа всех шести опор которого позволила последовательно вращать и переме-

щать платформу вдоль осей Ox , Oy и Oz , т. е. двигаться по заданной траектории, используя все шесть степеней свободы.

После положительного завершения четвертого этапа МОП был реализован полноценный учебный стенд, который состоял из следующих элементов:

- механического ПМ, опоры которого приводились в движение шестью микросерводвигателями (см. рис. 3, *a*);
- системы управления на основе микроконтроллерной платы Arduino Mega 2560;
- системы автономного питания, включающей Li-Ion-батарею напряжением 7,8 В, и двух понижающих преобразователей напряжения постоянного тока для раздельного питания электроники и силовой части (микросерводвигателей).

Необходимые траектории движения платформы ПМ записывались в аппаратную часть микроконтроллерной системы управления заранее через USB-интерфейс. При этом если траекторию движения платформы можно было представить компактно в виде циклически повторяющихся комбинаций непрерывных функций (как, например, на рис. 14, *a*), то управляющая программа содержала предложенный способ решения ОЗК и контроллер постоянно пересчитывал требуемые углы поворота кривошипов. В другом случае ОЗК решалась на компьютере, а в контроллер уже записывался двухмерный массив, содержащий значения углов поворота для всех кривошипов через одинаковые промежутки времени. После запуска системы данный массив считывался из памяти циклически.

Заключение. Благодаря применению технологии МОП за пять последовательных этапов было спроектировано, протестировано и изготовлено законченное электромеханическое устройство с микроконтроллерным управлением. Полученный ПМ обладает шестью степенями свободы и способен перемещать полезный груз массой 150 г со скоростью 50 мм/с в рабочей зоне каплевидной формы и объемом 0,64 дм³.

Процесс реализации МОП был выполнен с помощью целого ряда программных продуктов Mathworks, что позволило эффективно и беспрепятственно их комбинировать. Посредством среды и языка программирования MATLAB была доказана работоспособность предложенного способа решения ОЗК для конкретного ПМ. Пакет Simulink Simscape Multibody дал возможность реализовать трехмерную твердотельную модель подвижного механического объекта, которая максимально точно имитирует физические свойства проектируемого манипулятора. Пакет Simulink Support Package for Arduino Hardware позволил не только смоделировать аппаратную часть будущей системы управления, но и сгенерировать управляющие программы для реализации различных траекторий движения платформы ПМ на реальной микроконтроллерной плате Arduino Mega 2560.

Применение технологии МОП позволило значительно сократить сроки разработки сложного механического устройства и его системы управления. Сложность управления любым параллельным механизмом заключается в том, что при несогласованной работе его подвижных опор отрицательными результатами будет не только рассогласование с требуемой траекторией движения платформы, но и выход из строя всего механизма из-за заклинивания его подвижных элементов.

Список использованных источников

1. Шахинпур, М. Курс робототехники : пер. с англ. / М. Шахинпур. – М. : Мир, 1990. – 527 с.
2. Merlet, J. P. Parallel Robots / J. P. Merlet. – 2nd ed. – Heidelberg : Springer, 2005. – 417 p.
3. Pandilov, Z. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots / Z. Pandilov, V. Dukovski // Acta Technica Corvininensis – Bulletin of Engineering. – 2014. – Vol. 7(1). – P. 143–160.
4. Parallel Manipulators, Towards New Applications / ed. Wu Hwapeng. – Vienna : I-Tech, 2008. – 506 p.
5. Кун, С. Структурный синтез параллельных механизмов / С. Кун, К. Госселин ; пер. с англ. Л. А. Рыбак, А. В. Чичварина ; под ред. А. В. Синева. – М. : Физматлит, 2012. – 276 с.
6. Прокопович, Г. А. Мобильный робот с нулевым радиусом поворота / Г. А. Прокопович // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 39–44.
7. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках / Е. Б. Щелкунов [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – № 12. – С. 52–61.

8. Талукдер, Ю. З. Модельно-ориентированное проектирование систем автоматического управления в инженерном образовании / Ю. З. Талукдер // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 174–182.

9. Применение модельно-ориентированного проектирования к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов / С. С. Журавлев [и др.] // Вестн. НГУ. Сер. Информационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 56–67.

References

1. Shahinpoor M. *A Robot Engineering Textbook Hardcover*. Harperrcollins College Div, 1987, 480 p.
2. Merlet J. P. *Parallel Robots*. 2nd ed. Heidelberg, Springer, 2005, 417 p.
3. Pandilov Z., Dukovski V. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 2014, vol. 7(1), pp. 143–160.
4. Wu Huapeng (ed.). *Parallel Manipulators, Towards New Applications*. Vienna, I-Tech, 2008, 506 p.
5. Kong X., Gosselin C. M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2007, vol. 33, 276 p.
6. Prakupovich R. A. Mobil'nyj robot s nulevym radiusom povorota [Mobile robot with zero-turn]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika [Robotics and Technical Cybernetics]*, 2015, vol. 2(7), pp. 39–44 (in Russian).
7. Shchelkunov E. B., Vinogradov S. V., Shchelkunova M. E., Samar E. V. Mekhanizmy paralel'noj struktury v metallorezhushchih stankah [Mechanisms of parallel structure in metal-cutting machines]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University]*, 2012, vol. 12, pp. 52–61 (in Russian).
8. Talukder Yu. Z. Model'no-orientirovannoe proektirovanie sistem avtomaticheskogo upravleniya v inzhenernom obrazovanii [Model-oriented design of automatic control systems in engineering education]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki [Scientific Review. Technical science]*, 2014, vol. 2, pp. 174–182 (in Russian).
9. Zhuravlev S. S., Rudometov S. V., Okol'nishnikov V. V., Shakirov S. R. Primenenie model'no-orientirovannogo proektirovaniya k sozdaniyu ASU TP opasnyh promyshlennyh ob"ektov [Application of model-oriented design to the creation of industrial control systems for hazardous industrial facilities]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Informacionnye tekhnologii [Bulletin of Novosibirsk State University. Series Information Technology]*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 56–67 (in Russian).

Информация об авторе

Прокопович Григорий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией робототехнических систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: rprakupovich@robotics.by

Information about the author

Ryhor A. Prakupovich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Robotics Systems Department, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: rprakupovich@robotics.by