

Манипуляционный робот на основе платформы Гью–Стюарта и его компьютерное моделирование

Кузнецов Андрей Сергеевич

НИУ “МЭИ”

Магистрант

Аннотация

Исследуются кинематика и динамика манипуляционного робота на основе платформы Гью – Стюарта. Обсуждается конструкция робота, постановка и порядок решения прямой и обратной задач кинематики. Рассматривается реализация 3D-модели исследуемого манипуляционного робота при помощи пакета Simulink интегрированной среды MATLAB, представлены результаты компьютерного моделирование динамики робота.

Ключевые слова: манипулятор, механизмы параллельной структуры, платформа Гью–Стюарта, программное движение, MATLAB Simulink, компьютерное моделирование

Manipulative robot based on the Gough-Stewart platform and its computer simulation

Kuznecov Andrej Sergeevich

NRU “MЭИ”

Graduate

Abstract

The kinematics and dynamics of a manipulative robot based on the Gough-Stewart platform are investigated. The design of the robot, the formulation and the solving of the direct and inverse problems of kinematics are discussed. The implementation of a 3D model of the manipulative robot using the Simulink package of the MATLAB integrated environment is considered, the results of computer simulation of the robot dynamics are presented.

Keywords: manipulator, parallel mechanisms, Gough-Stewart platform, program motion, MATLAB Simulink, computer simulation

Растущие потребности современного производства в роботах самого разнообразного назначения требуют разработки новых конструкций роботов. Помимо традиционных манипуляционных роботов с последовательной структурой, наблюдается рост интереса к роботам параллельной структуры, примером которых служат роботы на основе платформы Гью – Стюарта. Исполнительные механизмы параллельных роботов образованы замкнутыми кинематическими цепями, причём обычно выходное звено со стойкой соединяют несколько цепей однотипного устройства.

Такой интерес обусловлен рядом достоинств параллельных роботов. В то время как для 6-звенных манипуляционных роботов с вращательными сочленениями отношение массы нагрузки к массе самого робота обычно не превышает 15 %, то для роботов параллельной структуры масса нагрузки может, напротив, в 10 раз и более превосходить массу робота. Эти роботы отличает и весьма неплохая точность позиционирования; они почти нечувствительны к изменению размеров, так что одинаковая структура подходит и для крупных роботов, и для мини- и микроботов [1].

Благодаря этому, роботы параллельной структуры уже нашли немало применений. На макроуровне это – авиационно-космические и спортивные тренажёры, средства телеинспекции трубопроводов и др. [2,3]; неплохие перспективы имеет использование промышленных роботов параллельной структуры в автомобилестроении, приборостроении, прецизионном станкостроении, экстремальной робототехнике [4]. На мини- и микроуровне речь идёт о применениях в медицине и микроэлектронике [2].

Первым примером механизма параллельной структуры, получившим практическое применение в робототехнике, стала платформа Гью – Стюарта. Её идея была предложена Эриком Гью (Великобритания) в 1947 году; в 1955 году он завершил работу над изготовлением её прототипа, а в следующем году описал её в статье [5]. В оригинальной конструкции Гью выходным звеном служила восьмигранная платформа с шестью телескопическими штангами, каждая из которых соединялась с платформой сферическим шарниром, а с основанием – универсальным шарниром Гука. В 1964 году принципиально сходное устройство предложил Клаус Каппель (США), а в 1965 году другой британский учёный, Дональд Стюарт, в своей статье [6], получившей широкую известность, независимо предложил аналогичную конструкцию для использования в составе авиационного тренажёра для динамической имитации полётов [1,4].

Создание таких тренажёров и стало первой областью, в которой платформа Гью–Стюарта (её называют по-разному: «платформой Гью – Стюарта» [4], «платформой Стюарта» [7], «стендом опорного типа» [8] или «гексаподом» [9]) нашла своё практическое применение. Используя в этих тренажёрах имитационные стенды имели различную конструкцию.

Так, в работах [8,10] приведён обзор результатов, полученных при исследовании динамики стендов, в которых платформа была соединена с основанием при помощи трёх- или четырёхосного карданова подвеса (такая конструкция позволяет имитировать изменение ориентации летательного аппарата). При этом применялось как аналитическое исследование динамики стенда методами фракционного анализа [11,12], так и её компьютерное моделирование – при помощи программного комплекса DYANA [13].



Рисунок 1 - Общий вид оригинальной платформы Гью

Другую конструкцию имел имитационный стенд, установленный в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина (ЦПК). В состав стенда входили центрифуга ЦФ-18 и размещённая на ней в кардановом подвесе кабина для тренирующихся космонавтов. Были исследованы динамика и управление таким стендом, а для системы управления им создано необходимое программное обеспечение [14,15].

Применение платформы Гью–Стюарта в качестве имитационного динамического стенда позволило одновременно имитировать не только изменение ориентации летательного аппарата, но и – в определённых пределах – линейные перемещения. В статьях [16,17] исследованы вопросы управления динамическим стендом такого типа, в статье [18] приводится разработанный авторами алгоритм динамической имитации полёта. В работе [8] представлены результаты как аналитического, так и численного исследования динамики данного стенда (компьютерное моделирование выполнялось при помощи программного комплекса HELIX [19]).

Продолжением этих работ стали статьи [20], где изучены вопросы стабилизации платформы Гью – Стюарта при наличии ветровых возмущений (эти вопросы стали актуальными в связи с применением такой платформы

для управления активной поверхностью зеркала радиотелескопа), и [21], где рассмотрена стабилизация положения равновесия данной платформы.

Другой сферой применения параллельных роботов стала задача телеинспекции трубопроводов с целью выявления дефектов внутренних поверхностей труб. Среди рассматривавшихся в научной литературе типов внутритрубных роботов выделяют [22]: колёсные [23,24], шагающие [25,26], змеевидные [27,28], офиуроподобные [29,30] и другие типы роботов.

В работах [3,31] рассмотрен внутритрубный робот типа «додекапод» – односекционный параллельный робот (его конструкцию рассматривают как видоизменение платформы Гью – Стюарта). Для него исследованы условия проходимости прямолинейных и криволинейных труб меняющегося сечения и предложены алгоритмы его перемещения в трубах.

Заметим, что простейшие параллельные механизмы (такие, как платформа Гью – Стюарта) используют также как секции, последовательным соединением которых получают многосекционные манипуляционные параллельные роботы. Так, из четырёх идентичных секций, каждая из которых представляет собой платформу Стюарта, составлен манипулятор LX-4 компании Logabex [7,32]. Другим примером служит многосекционный манипулятор типа «хобот», геометрия и динамика которого исследованы в статьях [33,34], а в работе [35] представлен алгоритм решения прямой задачи кинематики при произвольном числе секций и проведено компьютерное моделирование движения применительно к трёхсекционному роботу. Многосекционные манипуляторы такого типа нередко имеют лучшие показатели (включая объём рабочей зоны и манипулятивность) по сравнению с односекционными манипуляторами параллельной структуры [7].

Тем не менее, исследование платформы Гью – Стюарта как таковой продолжает оставаться актуальным. Среди относительно недавних работ этой тематики отметим статью [36], где при изучении кинематики платформы получены явные выражения для обратной матрицы Якоби и производной от неё по времени, а при анализе динамики учитывались трение в шарнирах и динамика штанг. В работе [37] показано, что решение прямой и обратной задач кинематики для платформы Гью – Стюарта упрощается при использовании кватернионов. В статье [38] для этой платформы дан оригинальный способ решения прямой задачи кинематики, основанный на получении в аналитическом виде уравнения плоскости платформы, что сводится к решению системы однотипных нелинейных уравнений.

Настоящая работа также посвящена исследованию кинематики и динамики платформы Гью–Стюарта, включающему компьютерное моделирование движения данного манипуляционного робота.

Известны разные варианты конструкции платформы Гью–Стюарта. Они различаются расположением шарниров на платформе и основании: шарниры каждой группы либо размещают равномерно (в вершинах правильного шестиугольника), либо сближают их попарно – вплоть до слияния каждой пары в один шарнир.

Конкретизируем сейчас конструкцию исследуемого робота и выберем случай, когда шарниры и на основании, и на платформе попарно сближены (рис. 2).

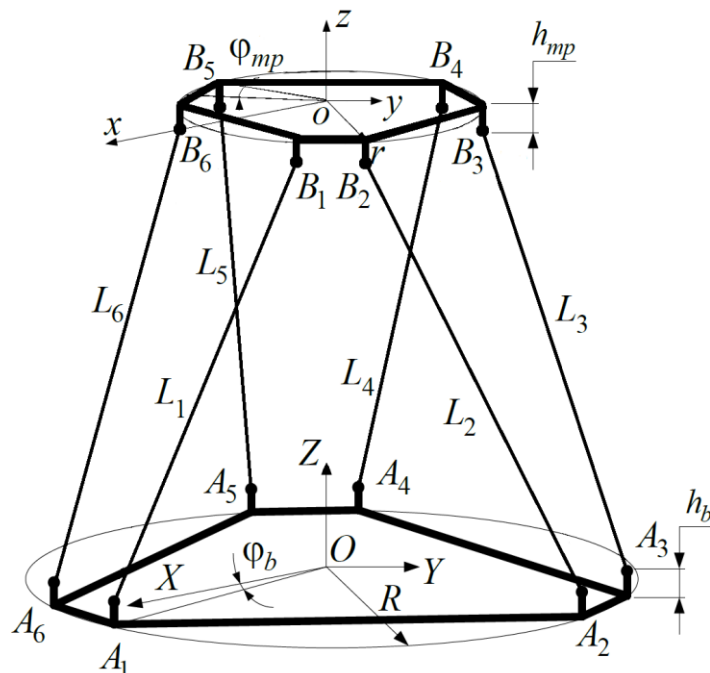


Рисунок 2 - Выбранный вариант конструкции робота

Обозначения на рисунке взяты из работы [7]. Здесь A_i и B_i – соответственно нижний и верхний шарниры i -й телескопической штанги, L_i – её текущая длина (далее эти длины играют роль обобщённых координат), R и r – радиусы описанных окружностей для многоугольников, образованных шарнирами на основании и платформе, h_b и $h_{тр}$ – расстояния шарниров A_i и B_i от плоскостей основания и платформы соответственно, φ_b и $\varphi_{тр}$ – угловые координаты шарниров A_1 и B_1 . Все шарниры сейчас предполагаются сферическими.

Свяжем с основанием и платформой две системы отсчёта (каждую из них здесь мы трактуем, следуя [39,40], как геометрическую твёрдую среду, наделённую структурой евклидова точечного пространства). Выберем в каждой из них декартову систему координат (их оси показаны на рис. 2) и введём обозначения r_i^o и r_i^* для столбцов компонент радиус-векторов точек A_i и B_i соответственно в неподвижной и подвижной системах координат. Эти столбцы являются постоянными – в отличие от столбца компонент r_i радиус-векторов точек B_i в неподвижных осях.

Взаимосвязь между столбцами r_i и r_i^* находим с помощью основной формулы геометрии движения [39]:

$$r_i = \Gamma r_i^* + r_o. \quad (1)$$

Здесь Γ – матрица направляющих косинусов платформы, т.е. матрица её оператора ориентации (он осуществляет отнесение заданных в связанной с телом системе отсчёта векторов к условно неподвижной системе отсчёта), а r_o – столбец компонент радиус-вектора начала O подвижной системы координат в неподвижных осях. Элементы этого столбца – декартовы координаты x_o, y_o, z_o точки O , а матрица Γ известным образом зависит от эйлеровых углов α, β, γ : $\Gamma = \Gamma(\alpha, \beta, \gamma)$.

При компьютерном моделировании был использован конкретный набор эйлеровых углов: углы рыскания, крена и тангажа [40].

Объединим опорные координаты платформы $\alpha, \beta, \gamma, x_o, y_o, z_o$ в один шестимерный столбец X , а обобщённые координаты L_i – в шестимерный столбец L . Тогда прямая задача кинематики будет состоять в нахождении матрицы Γ и столбца r_o как функций обобщённых координат, а обратная задача кинематики – в нахождении столбца L как функции столбца X .

Для параллельных механизмов (в отличие от манипуляторов обычной последовательной структуры) решение обратной задачи кинематики намного проще и выполняется по явным формулам. Именно, введём для i -й штанги столбец l_i как разность столбцов r_i и r_i^o ; тогда данный столбец можно в силу (1) найти по формуле

$$l_i = \Gamma r_i^* + r_o - r_i^o, \quad (2)$$

после чего длина штанги L_i вычисляется как евклидова норма этого столбца.

Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью – Стюарта значительно более сложно (оно включает, в частности, численное решение системы из девяти нелинейных уравнений), и соответствующих соотношений здесь мы не приводим.

Кинематические соотношения для обеих задач кинематики были запрограммированы в интегрированной среде MATLAB; предварительно же при помощи библиотеки SimMechanics была построена базовая 3D-модель исследуемого робота.

Библиотека SimMechanics входит в пакет Simulink системы MATLAB. Она предназначена для моделирования пространственного движения систем твёрдых тел на стадии инженерного проектирования. Описывающие кинематику и динамику системы дифференциальные уравнения при этом представляются в виде структурной модели, состоящей из отдельных блоков. При этом моделируемая система описывается, как и в других моделях пакета Simulink, блочной диаграммой. Сами блоки SimMechanics служат моделями как механических устройств, входящих в состав системы твёрдых тел, так и соединений между ними [41,42].

Для создания моделей каждого из абсолютно твёрдых тел, образующих рассматриваемый манипулятор (это – основание, подвижная платформа и

верхняя и нижняя части каждой из штанг) используем блок Body. Далее эти тела соединяем вместе при помощи подходящих блоков Joint библиотеки SimMechanics. Чтобы связать с основанием условно неподвижную систему отсчёта, задействуем блок Ground.

Использован также блок Machine Environment, который подключается к блоку Ground. При помощи данного блока мы задаём для платформы Гью – Стюарта параметры механической среды моделирования: вектор гравитации, размерности и метод анализа модели, точность вычислений и др. Его применение обеспечивает также быструю визуализацию движения робота в реальном времени.

В окне визуального наблюдения звенья робота представлены либо поверхностями, построенными по характерным точкам на данных звеньях, либо эллипсоидами, положение и размеры которых зависят от положения центров масс тел и их массово-инерционных свойств. Специальные знаки используются, чтобы выделить характерные точки определённого вида; в частности, знак «разделённый на 4 части крестом круг» отмечает текущие положения центров масс звеньев.

Геометрию платформы в её начальной конфигурации и инерционные параметры звеньев (при расчёте последних значение плотности было взято таким, как у стали) определяем при помощи соответствующих скриптов.

Сочленение между обеими частями штанги является управляемым, и для моделирования соответствующего привода мы используем блок Joint Actuator. Для упомянутого сочленения задействуем также блок Joint Sensor, что даёт возможность получать нужные значения перемещений и скоростей, используемые разрабатываемым контроллером.

Для отработки задаваемого программного движения был разработан контроллер из двух секций: траекторного блока штанги и ПИД-регулятора. Траекторный блок штанги обеспечивает расчёт программных значений обобщённых координат L_i в соответствии с формулой (2). Назначение ПИД-регулятора, имеющего обратные связи по положению и скорости, состоит в стабилизации программного движения штанги; значения его коэффициентов усиления также задавались при помощи скриптов.

Компьютерное моделирование движения рассматриваемого робота с использованием созданной базовой 3D-модели, позволило визуализировать движение исследуемого робота как при решении обратной и прямой задач кинематики, так и при решении обратной задачи динамики. Последняя заключалась в определении управляющих усилий в штангах, требуемых для реализации программного движения (в движении, результаты моделирования которого представлены ниже, эйлеровы углы и координаты x_o, y_o, z_o изменялись с течением времени по синусоидальному закону).

Всякий раз для начала моделирования в строке меню окна модели следовало выбрать опции Simulink и Start. В процессе моделирования при помощи блока Scope можно в реальном масштабе времени просматривать

нужные сигналы. Просмотреть результаты можно и тогда, когда процесс моделирования завершится.

Приведём изображения конфигураций платформы Гью – Стюарта в различные моменты времени, полученные при решении обратной задачи динамики (рис.3,4).

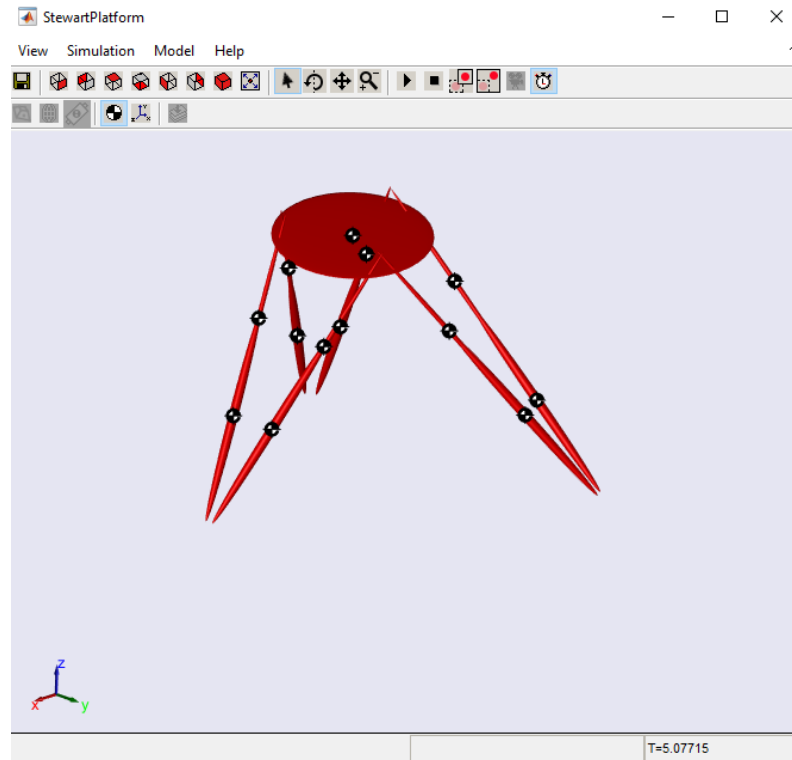


Рисунок 3 - Конфигурация платформы на 5-й секунде моделирования

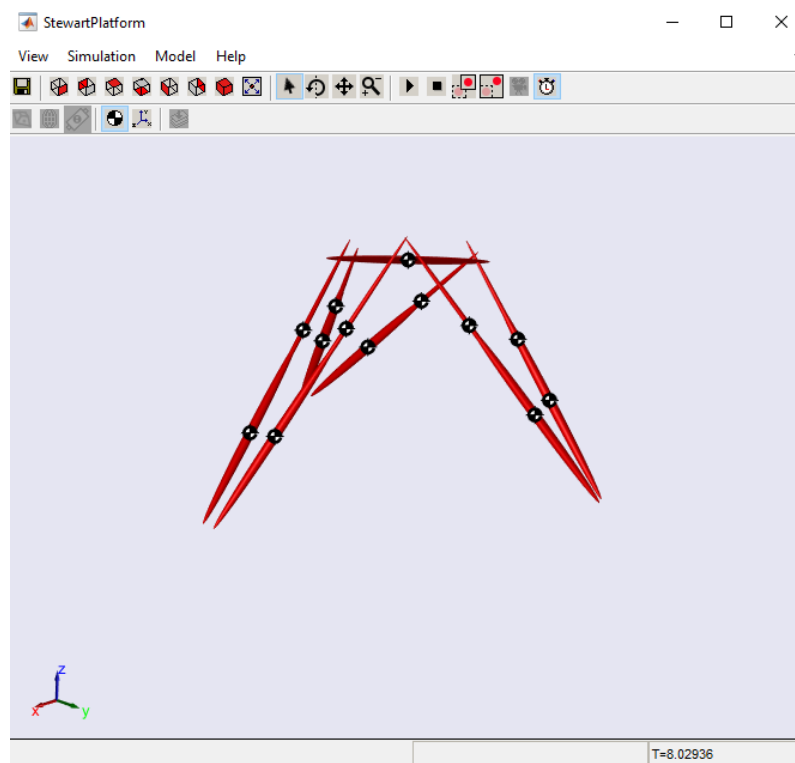


Рисунок 4 - Конфигурация платформы на 8-й секунде моделирования

В данном случае зависимости длин штанг платформы Гью – Стюарта от времени оказались такими, как это показано на рис.5.

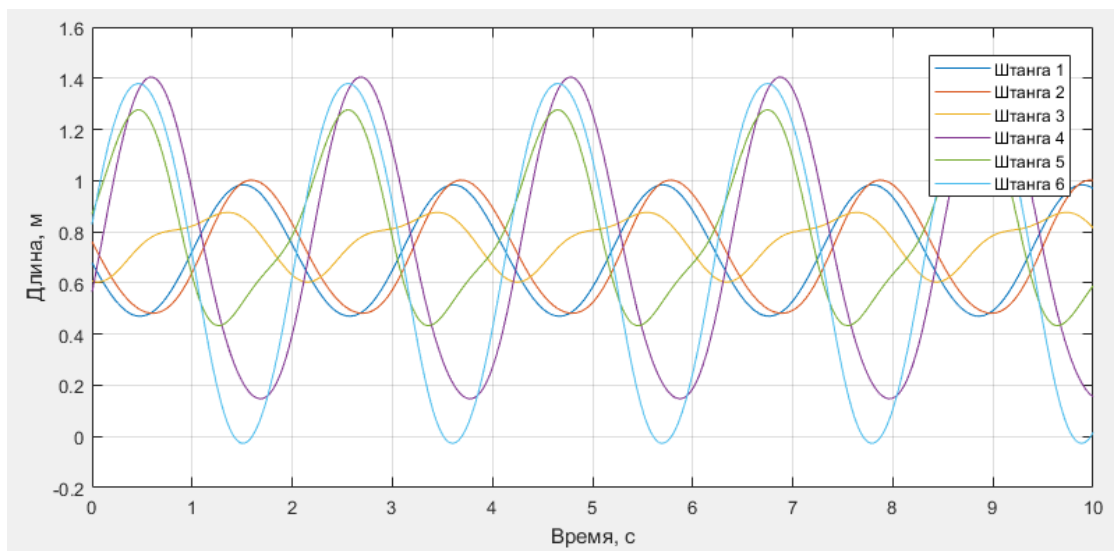


Рисунок 5 - График зависимости длин штанг от времени

Вычислительные эксперименты с реализованной при помощи пакета Simulink и библиотеки SimMechanics базовой 3D-моделью платформы Гью – Стюарта и анализ их результатов при различном выборе программного движения, подтвердили корректность этой модели. Представляется, что изложенный подход применим и к задачам компьютерного моделирования кинематики и динамики других роботов параллельной структуры.

Библиографический список

1. Merlet J.-P., Gosselin C., Huang Tian. Parallel Mechanisms. 2nd edition // Springer Handbook of Robotics / Ed. by B. Siciliano, O. Khatib. Berlin: Springer-Verlag, 2016. P. 443–462.
2. Саяпин С.Н. Додекапод как современный этап развития пространственных параллельных роботов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2012. № 6. С. 31–45.
3. Карпенко А.П., Данг Суан Хиеп, Саяпин С.Н. Алгоритм движения додекапода в прямолинейной цилиндрической трубе переменного сечения // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 325–340. doi: 10.7463/0813.0587740
4. Доронин Ф.А. Исследование кинематики пространственного механизма параллельной структуры в среде Mathcad // Теория механизмов и машин. 2015. Т. 13, № 27. С. 27–36. doi: 10.5862/ТММ.27.3
5. Gough V.E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance // Proceedings of the Automobile Division of the Institution of Mechanical Engineers. 1956. Vol. 171, no. 8. P. 392–394.
6. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proceedings of the

- Institution of Mechanical Engineers. London. 1965. Vol. 180, no. 15. P. 371–385.
7. Лапиков А.Л., Пащенко В.Н., Масюк В.М. Модификация метода решения прямой задачи кинематики для класса платформенных манипуляторов с шестью степенями свободы // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 11. С. 72–94. doi: 10.7463/1114.0735505
 8. Новожилов И.В., Осадченко Н.В. Устойчивость квазистационарных движений имитационных стендов // Математические задачи динамической имитации аэрокосмических полётов / В.В. Александров, Л.И. Воронин, Ю.Н. Глазков, А.Ю. Ишлинский, В.А. Садовничий. М.: Изд-во МГУ, 1995. ISBN 5-211-03336-1. С. 108–122.
 9. Доронин Ф.А. Применение теории винтов в статике и динамике пространственных механизмов параллельной структуры // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. № 3 (44). С. 130–137.
 10. Новожилов И.В., Осадченко Н.В. Анализ динамики имитационных стендов // Александров В.В., Садовничий В.В., Чугунов О.Д. Математические задачи динамической имитации полёта. М.: Изд-во МГУ, 1986. С. 91–106.
 11. Осадченко Н.В. Об устойчивости трёхстепенного динамического стенда // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1982. № 1. С. 20–27.
 12. Новожилов И.В. Управление четырехосным кардановым подвесом // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1983. № 4. С. 66–70.
 13. Осадченко Н.В. Моделирование динамики систем взаимосвязанных твёрдых тел средствами программного комплекса DYANA // Труды Московского энергетического института. Вып. 573. Задачи механики управляемых систем и методы их исследования. М.: МЭИ, 1982. С. 81–86.
 14. Александров В.В. Абсолютная устойчивость имитационных динамических систем в первом приближении // Доклады АН СССР. 1989. Т. 299, № 2. С. 296–301.
 15. Садовничий В.А., Александров В.В. Динамическая имитация аэрокосмических полётов // Математическое моделирование. 1994. Т. 6, вып. 6. С. 5–8.
 16. Ершов Б.А., Трифоненко Б.В. Движение твёрдого тела при действии управляющих связей // Вестник Ленинградского университета. Серия 1: Математика, механика, астрономия. 1985. № 8. С. 52–56.
 17. Данилов А.В., Трифоненко Б.В. Программное управление движением динамического стенда // Вестник Ленинградского университета. Серия 1: Математика, механика, астрономия. 1988. № 4. С. 49–53.
 18. Александров В.В., Дылевский И.В., Зименков В.Д. и др. Алгоритм имитации полёта на динамическом стенде опорного типа // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1983. № 2. С. 30–37.
 19. Осадченко Н.В. Метод винтов в вычислительной механике // Проблемы механики управляемых систем, машин и механизмов: Межвузовский тематический сборник № 77. М.: МЭИ, 1985. С. 61–68.

20. Александров В.В., Локшин Б.Я., Гомес-Эспарса Л., Саласар-Ибаргуэн У. Стабилизация управляемой платформы при наличии ветровых возмущений // *Фундаментальная и прикладная математика*. 2005. Т. 11, № 7. С. 97–115.
21. Зуев С.М. Стабилизация положения равновесия платформы Стюарта с тремя степенями свободы // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2013. № 4. С. 84–92.
22. Безобразова А.А. Моделирование движения автономной мобильной платформы-инспектора // *Постулат*. 2018. № 6. Ст. 46. URL: <http://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/1638/1672>
23. Tătar M.O., Pop A. Development of an in pipe inspection minirobot // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 147. Article ID 012088. doi: 10.1088/1757-899X/147/1/012088
24. Abdellatif M., Mohamed H., Hesham M., Abdelmoneim A., Kamal A., Khaled A. Mechatronics design of an autonomous pipe-inspection robot // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 153, no. 1. Article ID 02002. doi: 10.1051/mateconf/201815302002
25. Болотник Н.Н., Костин Г.В., Черноусько Ф.Л. Движение шагающего аппарата в тороидальной трубе // *Известия Академии наук. Механика твёрдого тела*. 1998. № 4. С. 86–101.
26. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Ворочаев А.В. Алгоритм генерации походок для робота, осуществляющего движение в трубопроводах // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2017. Т. 7, № 1 (22). С. 90–97.
27. Поезжаева Е.В., Балабанов Д.С., Перевозчикова Н.О. Кинематика бесколёсного змеевидного робота для диагностики трубопроводов // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. 2013. Т. 1. С. 291–299.
28. Афонин А.Н., Алейников А.Ю., Гладышев А.Р., Попова А.В. Разработка математической модели системы управления звеньями змееподобного робота // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 1. С. 150–154. doi: 10.12737/24122
29. Осадченко Н.В., Абдельрахман А.М.З. Компьютерное моделирование движения мобильного ползающего робота // *Вестник МЭИ*. 2008. № 5. С. 131–136.
30. Осадченко Н.В., Абдельрахман А.М.З. Моделирование движения робота, ползающего по гладкой поверхности // *Вестник МЭИ*. 2010. № 3. С. 28–36.
31. Данг Суан Хиеп, Карпенко А.П., Саяпин С.Н. Внутритрубный робот параллельной структуры типа додекапод // *Экстремальная робототехника*. 2016. Т. 1, № -1. С. 330–339.
32. Лапиков А.Л., Масюк В.М. Анализ исторического развития многосекционных механизмов параллельной структуры // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2017. Т.9, № 2. Ст. 66. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/79TVN217.pdf>
33. Волкоморов С.В., Карпенко А.П. Геометрия многосекционного

- манипулятора типа «хобот» // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. № 12. Ст. 3. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/163391.html>
34. Карпенко А.П., Шмонин А.М. Исследование динамики многосекционного манипулятора типа «хобот» // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. № 9. Ст. 6. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/157912.html>
35. Лапиков А.Л., Пащенко В.Н. Алгоритм решения прямой задачи кинематики многосекционного манипулятора параллельной структуры // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 76–95. doi: 10.7463/1214.0747668
36. Harib K., Srinivasan K. Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures // Robotica. 2003. Vol. 21, no. 5. P. 541–554. doi: 10.1017/S0263574703005046
37. Смирнов В.А., Фёдоров В.Б. Использование кватернионов при математическом моделировании механизмов с параллельными кинематическими цепями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2008. № 10 (110). С. 24–29.
38. Лапиков А.Л., Пащенко В.Н. Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью – Стюарта с использованием аналитического уравнения плоскости // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 4. С. 124–134. doi: 10.7463/0414.0706936
39. Корецкий А.В., Осадченко Н.В. Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 48 с.
40. Айзерман М.А. Классическая механика. 3-е изд. М.: Физматлит, 2005. 380 с.
41. Щербаков В.С., Корытов М.С., Руппель А.А., Глушец В.А., Милушенко С.А. Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLAB. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 84 с.
42. Мусалимов В.М., Заморуев Г.Б., Калапышина И.И., Перечесова А.Д., Нуждин К.А. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink/SimMechanics). СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 114 с.