

Л.А. Рыбак, А.А. Волошкин, К.В. Чуев, Д.И. Малышев, В.М. Скитова

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
С ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВИРТУАЛЬНЫХ 3D МОДЕЛЕЙ
РЕАЛЬНОЙ МЕСТНОСТИ***

Разработка современных тренажерных комплексов для симуляции управления транспортными средствами является актуальной задачей из-за высокой цены ошибок управления, которая может быть решена при помощи механизмов параллельной структуры. В статье представлены актуальные исследования в области создания модели и реального прототипа тренажерного комплекса для обучения водителей транспортных средств и спецтехники на базе динамической шестистепенной платформы подвижности. Одним из обязательных требований при проектировании платформы является исключение из рабочей области особых положений, в которых механизм теряет свою управляемость и могут возникать сбои в работе. В статье представлены результаты исследований влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики и геометрию рабочего пространства платформы Гофа-Стюарта (коммерческое название – «Гексапод»). Разработан виртуальный прототип роботизированной платформы в MSC Adams, который позволил выполнить имитационное моделирование кинематических и динамических параметров, характеризующих эксплуатационные условия под действием рабочих нагрузок. Определены наибольшие результирующие силы, действующие на шарниры при максимальной скорости, которую может развить актуатор. В соответствии с предельной нагрузкой выполнено построение 3D модели тренажерного комплекса при помощи систем автоматизированного проектирования. В статье представлены результаты проектирования тренажерного комплекса, изготовлен прототип. Тренажер состоит из верхней платформы и основания, которые соединены поступательными электроприводами. На верхней платформе установлена кабина водителя, которая имеет органы управления повторяющие органы управления автомобилем. Вывод изображения симуляции происходит на установленные мониторы. Для взаимодействия и погружения водителя в среду симуляции разработан программно-аппаратный комплекс «Маршрут», со следующими функциональными возможностями: – автоматизированное формирование цифровой модели рельефа (в том числе областей урбанистической застройки) на основе электронных топографических карт, библиотек трехмерных объектов, результатов лазерного сканирования реальных участков местности, данных от мобильных комплексов с прецизионным навигационным оборудованием; – создание новых трехмерных объектов; – настройка поведенческой модели динамических объектов (интеллектуальных агентов), разработанной с использованием принципов многоагентных систем; – создание комплексов упражнений с различными аварийными ситуациями для обучаемых. Экспериментальные исследования прототипа позволили оценить его возможности и характеристики, скорректировать алгоритмы. Результаты исследований, представленные в статье, будут способствовать созданию прочной инфраструктуры, содействие обеспечению всеохватной и устойчивой индустриализации.

Тренажер; виртуальная модель; платформа Гофа-Стюарта; прямая задача кинематики; имитационное моделирование; цифровой двойник; прототип.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01614, <https://rscf.ru/project/22-29-01614>.

L.A. Rybak, A.A. Voloshkin, K.V. Chuev, D.I. Malyshev, V.M. Skitova

**METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DESIGNING A SIMULATOR
COMPLEX FOR TRAINING DRIVERS OF VEHICLES AND SPECIAL
EQUIPMENT WITH AN INTEGRATED SYSTEM OF VIRTUAL 3D MODELS
OF REAL TERRAIN**

The development of modern training complexes for simulating vehicle control is an urgent task due to the high cost of control errors, which can be solved using parallel structure mechanisms. The article presents current research in the field of creating a model and a real prototype of a simulator complex for training drivers of vehicles and special equipment based on a dynamic six-degree mobility platform. One of the mandatory requirements when designing a platform is the exclusion from the working area of special positions in which the mechanism loses its controllability and malfunctions may occur. The article presents the results of studies of the influence of special positions on the solution of the direct problem of kinematics and the geometry of the working space of the Gough-Stewart platform (commercial name - "Hexapod"). A virtual prototype of the robotic platform was developed at MSC Adams, which made it possible to simulate the kinematic and dynamic parameters that characterize the operating conditions under the action of workloads. The greatest resultant forces acting on the hinges at the maximum speed that the actuator can develop are determined. In accordance with the ultimate load, a 3D model of the training complex was built using computer-aided design systems. The article presents the results of designing a training complex, a prototype is made. The simulator consists of an upper platform and a base, which are connected by translational electric drives. The driver's cabin is installed on the upper platform, which has controls similar to those of the car. The simulation image is displayed on the installed monitors. For the interaction and immersion of the driver in the simulation environment, the software and hardware complex "Route" has been developed, with the following functionality: – automated formation of a digital terrain model (including areas of urban development) based on electronic topographic maps, libraries of three-dimensional objects, results of laser scanning of real terrain, data from mobile complexes with precision navigation equipment; – creation of new three-dimensional objects; – setting up a behavioral model of dynamic objects (intelligent agents), developed using the principles of multi-agent systems; – creation of sets of exercises with various emergency situations for trainees. Experimental studies of the prototype made it possible to evaluate its capabilities and characteristics, and adjust the algorithms. The research results presented in the article will contribute to the creation of a solid infrastructure, promoting the provision of inclusive and sustainable industrialization.

Training apparatus; virtual model; Gough-Stewart platform; direct problem of kinematics; simulation modeling; digital twin; prototype.

Введение. В настоящее время все чаще используются различные симуляторы для обучения профессиональным навыками. Технологии виртуальной и дополненной реальности позволяют погрузить учащихся в реалистичные условия труда. Одним из наиболее востребованных направлений обучения при помощи симуляции – это обучение управлению транспортным средством. Это связано с тем, что стоимость подземных, наземных, водных или воздушных средств передвижения крайне высока, а ошибка в управлении фатальна. Все симуляторы обучения вождению автомобиля классифицируют на профессиональные, которые очень сложны технически и применяются в автошколах, и домашние, которые можно использовать на ноутбуке. Разработка профессиональных симуляторов вождения является комплексной задачей, которая решается различными способами. Ряд разработок в области симуляторов управления транспортными средствами направлены на получение высококачественного, реалистичного изображения с применением виртуальной реальности и нейросетях алгоритмов [1–3]. Другим направлением является создание физического окружения водителя, которое повторяет кабину реального транспортного средства со всеми органами управления [4, 5], что представляет собой целый тренажерный комплекс для обучения водителя или пилота. Вышеука-

занные симуляторы позволяют получить представление о распространенных ситуациях, возникающих при управлении транспортным средством, а также получить навыки управления, однако стационарные симуляторы не могут передать динамику движения транспортного средства, отсутствие которой приводит к неверному пониманию принципов управления летательными или наземными большегрузными транспортными средствами гражданского и военного назначения. Работы над такими тренажерами уже ведутся длительное время, но с учетом сложности разработки и высокой стоимости, изначально применялись только для подготовки космических полетов. Специфика пилотирования летательными аппаратами одно из направлений, в котором активно ведутся разработки динамических симуляторов в том числе для удаленного управления [6–8]. Одним из средств, которые могут обеспечить требуемые параметры движения – это параллельные механизмы благодаря таким преимуществам, как высокая жесткость, точность, грузоподъемность и низкая стоимость изготовления. Платформа Гофа-Стюарта имеет соответствующие преимущества, а также 6 степеней свободы, что обосновывает её использование в различных симуляторах и тренажерах. Существует множество конфигураций платформы Гофа-Стюарта и механизмов на её основе. В каждой из конфигураций платформа включает 6 штанг переменной длины, однако число шарниров основания и подвижной платформы может быть различным. В статье [9] рассмотрено проектирование 6-RUS конфигурации для авиасимулятора и оптимизация геометрических параметров с учетом физических ограничений работы механизма.

В данной работе будет рассмотрено проектирование тренажерного комплекса обучения управлению транспортными средствами на базе платформы Гофа-Стюарта. Исследования, посвященные тренажерам на базе платформы Гофа-Стюарта известны и рассмотрены в ряде работ, которые исследуют влияние тангажа и крена на эффективность обучения используя выборку испытуемых [10, 11]. Другие исследования направлены на создание эффектов вибрации, которые встречается при управлении транспортными средствами во всех средах [12]. А также работы, направленные на улучшение бокового ускорения и боковых движений, кренов и рыскания для более качественного восприятия собственного движения, путем устранения ошибок имитационных моделей и повышению качества управления [13–15].

Анализ существующих решений тренажерных комплексов на базе платформы Гофа-Стюарта позволил выявить следующее:

1. Большинство из них используется в качестве авиасимуляторов, а также для подготовки космонавтов для пилотируемых полетов.
2. Для обучения водителей наземных транспортных средств применяются тренажеры на базе либо трехступенных платформ, либо стационарной для имитации кабины или посадочного места водителя с виртуальным отображением передвижения транспортного средства.

В связи с этим, существует проблема создания эффективных тренажерных комплексов, обеспечивающих симуляцию транспортного средства по всем шести координатам в пространстве с возможностью отработки требуемой динамики движения реального транспортного средства с учетом рельефа и географии реальной местности в городской черте или за её пределами. Исследования, представленные в статье, направлены на создание методологических основ проектирования тренажерных комплексов на базе платформы Гофа-Стюарта на основе современных методов численного моделирования и CAD/CAM проектирования для построения цифровых двойников, адекватно отражающих свойства реальных прототипов, а также проектирования самих прототипов.

Математическая модель платформы. Рассмотрим структуру платформы Гофа-Стюарта. Платформа имеет 6 кинематических цепей, которые соединяют неподвижное основание с подвижной платформой, посредством линейных приводов (L_i) и универсальных шарниров у оснований (A_i и B_i). В зависимости от конфигураций количество шарниров основания и подвижной платформы может изменяться, а их расположение может быть, как свободным, так и на окружностях определенных радиусов. На рис. 1 показана пример конфигурации 6-3 платформы Гофа-Стюарта.

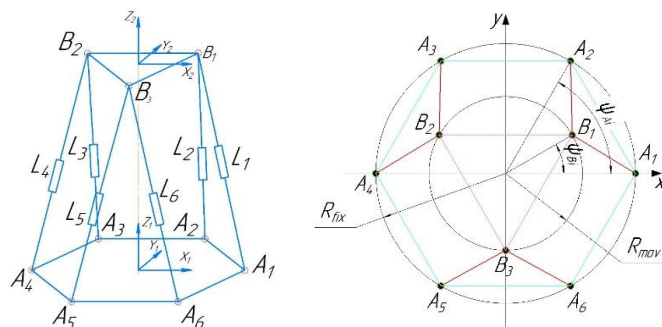


Рис. 1. Конфигурация 6-3 платформы Гофа-Стюарта

Решение обратной задачи кинематики платформы Гофа-Стюарта для входной координаты L_1 запишем как

$$L_1 = \left((A_{1x} - B_{1x})^2 + (A_{1y} - B'_{1y})^2 + (A_{1z} - B'_{1z})^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где B_{2x}, B_{2y}, B_{2z} – координата точки B_2 в системе координат $X_1Y_1Z_1$ неподвижной платформы. Аналогично определяется значения остальных входных координат. Координаты точек B_i определяются как

$$B_i = (B_{ix} \ B_{iy} \ B_{iz} \ 1)^T = M \cdot (B_{ix}^{(2)} \ B_{iy}^{(2)} \ B_{iz}^{(2)} \ 1)^T, \quad (2)$$

где $B_{ix}^{(2)}, B_{iy}^{(2)}, B_{iz}^{(2)}$ – координаты точек B_i в системе координат $X_2Y_2Z_2$ подвижной платформы, M – матрица преобразования для перехода от подвижной к неподвижной системе координат. Для составления матрицы преобразования используем углы Эйлера (α, β, γ).

Введём следующие обозначения: $c_\alpha = \cos(\alpha)$, $s_\alpha = \sin(\alpha)$, $c_\beta = \cos(\beta)$, $s_\beta = \sin(\beta)$, $c_\gamma = \cos(\gamma)$, $s_\gamma = \sin(\gamma)$. В таком случае матрицу преобразования M запишем как

$$M = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x & O_x \\ i_y & j_y & k_y & O_y \\ i_z & j_z & k_z & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\gamma - c_\beta s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\alpha - c_\alpha c_\beta s_\gamma & s_\beta s_\gamma & O_x \\ c_\beta c_\gamma s_\alpha + c_\alpha s_\gamma & c_\alpha c_\beta c_\gamma - s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\beta & O_y \\ s_\alpha s_\beta & c_\alpha s_\beta & c_\beta & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где O_x, O_y, O_z – координаты центра O подвижной платформы в системе координат $X_1Y_1Z_1$.

J.P. Merlet в своих работах [16, 17] отметил, что особое положение для платформы Гофа-Стюарта возникает при попадании оси любой из приводных штанг в плоскость подвижной платформы. Из этого следует что особое положение возникает в том случае, когда хотя бы одна из точек A_i принадлежит плоскости подвижной платформы. Условие возникновения особого положения можно записать в следующем виде

$$aA_{ix} + bA_{iy} + cA_{iz} + d = 0, \quad (4)$$

где a, b, c, d – коэффициенты уравнения плоскости подвижной платформы, которые определяются как

$$a = k_x, b = k_y, c = k_z, d = k_x O_x + k_y O_y + k_z O_z.$$

Попадание в особое положение происходит при смене знака левой части уравнения (3), следовательно, необходимо добавить условие его знакопостоянства

$$aA_{ix} + bA_{iy} + cA_{iz} + d > 0, \quad (5)$$

Ранее для данного механизма рассмотрена задача оптимизация параметров платформы подвижности с использованием PSO алгоритма в статье [18], а также для механизмов другого типа в работах [19, 20]. Критерий оптимизации основан на минимизации размеров конструкции с учётом требуемых соотношений между некоторыми параметрами. Ограничением оптимизации является условие обеспечения требуемой рабочей области с учётом диапазонов ориентации платформы.

Создание и расчет имитационной модели. Для моделирования кинематики и динамики, характеризующих эксплуатационные условия под действием рабочих нагрузок разработан виртуальный прототип роботизированной платформы, представленный на рис. 2. Его цифровая модель, имеющая свойства параметризованного цифрового двойника, создана в программном комплексе MSC Adams и состоит из 4 основных элементов (деталей): основания подвижной платформы, штока, поршня, которые обозначены на рисунке 2: M01...M60 – маркеры соответствующих шарнирных соединений; SJ – сферический шарнир; TJ – линейный привод (актуатор); CM – центр масс; PL – полезная нагрузка, приложенная в центре масс.

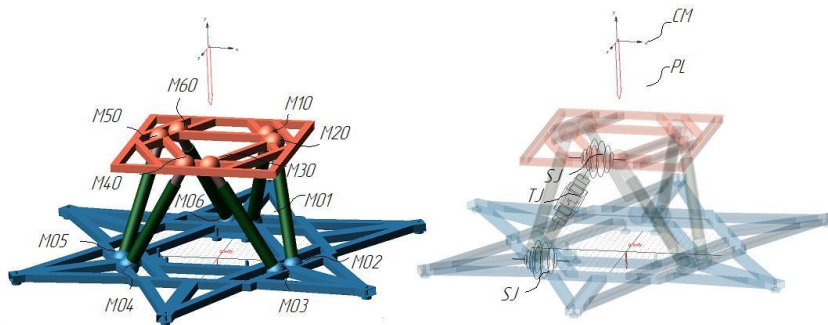


Рис. 2. Цифровая имитационная модель РПП выполненная в MSC Adams

Для испытания модели были отработаны 5 примитивных видов траекторий. Они выбраны с целью реализации наиболее жестких условий эксплуатации с точки зрения возникающих силовых нагрузок в элементах конструкции, а также для определения возможностей модели и комбинирования различных сочетаний траекторий. Все траектории обрабатывались при максимальной скорости, которую может развить актуатор. Исходным (начальным) положением для всех видов траекторий является позиция при котором подвижная часть платформы находится в горизонтальном положении, геометрические центры основания и подвижной части находятся на одной вертикальной линии (ось Y в модели), нулевое исходное положение по высоте выбрано минимально возможное положение верхней платформы, исходя из технических требований к РПП это 900 мм над уровнем пола при массе 600 кг. В результате были получены графики скорости (рис. 3), ускорения центра масс (рис. 4), и действие результирующих сил на шарниры (рис. 5).

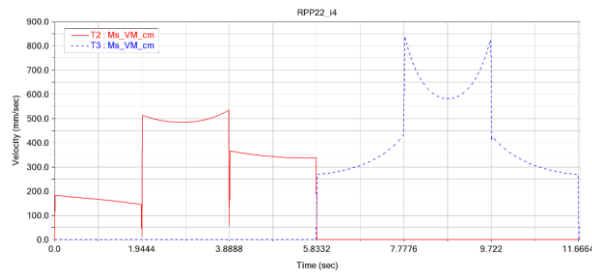


Рис. 3. Изменение результирующей скорости центра масс при выполнении траекторий

Резкие скачки и падения скоростей обусловлены тем, что при отработке завершения движения на участке все актуаторы останавливаются. Пиковые значения результирующей скорости возникают при отработке траектории №3.

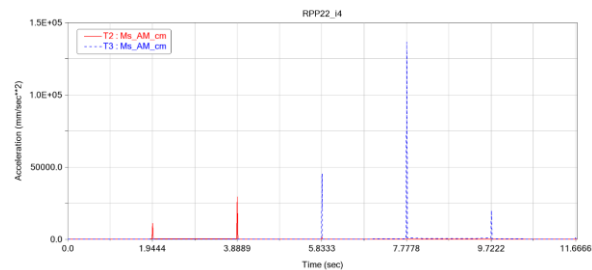


Рис. 4. Изменение результирующей ускорения центра масс при выполнении траекторий

На протяжении большего количества времени ускорение центра масс отсутствует, так как актуаторы ускоряются (замедляются) до максимальной скорости за $t=0,01$ с. Пики результирующей ускорения появляются во время разгона и замедления платформы. Пик ускорения центра масс возникает при отработке траектории №3. На данном участке происходит работа всех шести актуаторов, три из которых (A22, A33, A55) работают на удлинение, а других три (A11, A44, A66) в обратном направлении.

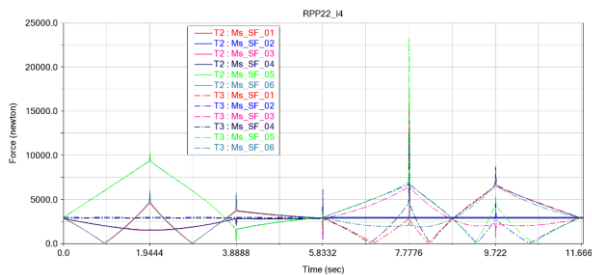


Рис. 5. Изменение результирующих силовых значений в шарнирах основания M01-M06 при отработке траекторий

Наибольший пик результирующей суммы сил, приложенных к шарниру, возникает при отработке траектории №3 (аналогично максимальному пику ускорения). Максимальное значение результирующей суммы сил приходится на шарнир опоры M05.

Наибольший пик результирующей суммы сил, приложенных к шарниру, возникает при обработке траектории 3 в момент времени $t=7.78$ с. Данные расчета пиковых значений результирующих сумм сил, приложенных к шарнирам M01-M06 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пиковые значения суммы сил, приложенных к шарнирам M01-M06

	t, с	M01, Н	M02, Н	M03, Н	M04, Н	M05, Н	M06, Н
Т2	0,91	119,25	5943,53	2017,68	2031,80	5950,11	105,48
	1,95	5888,98	10335,88	1630,05	1657,18	10369,98	6031,22
	2,91	90,60	5946,08	1869,81	1894,12	5950,71	79,31
	3,89	5661,14	240,51	2046,28	2051,13	269,42	5772,58
Т3	5,84	6172,77	440,47	605,40	4456,80	2073,24	6064,45
	7,78	16859,69	11744,76	17365,41	12497,20	23176,15	7834,03
	8,74	2626,85	2979,26	2802,07	2579,14	2936,76	2724,77
	9,73	7143,79	4886,21	719,80	8724,70	5485,17	8153,82

Цифровой двойник тренажерного комплекса. Исходя из предельной нагрузки на шарнирный узел, выполнено детальное проектирование тренажерного комплекса обучения управлению транспортными средствами (рис. 6). В соответствии с ГОСТ Р 52430-2005 и ГОСТ Р 52923-2008, выбраны карданные шарниры, а в соответствии с представленными в ГОСТе размерами поострены их цифровые двойники. Используя полученные данные предельной нагрузки, выбраны актуаторы, которые изготавливает ЗАО «Сервотехника» мощностью 1.6 кВт каждый. Детализированные цифровые модели актуаторов получены от производителя. Таким образом, в соответствии с выполненной оптимизацией были определены точки крепления актуаторов и построена рама платформы. Конструкция кабины тренажерного комплекса была разработана на базе имеющихся конструктивных решений предполагаемого завода изготовителя прототипа.

Платформа состоит из верхней платформы 1 и основания 2, которые соединены поступательными электроприводами 3. Каждый из поступательных электроприводов 3 соединен с верхней платформой 1 и основанием 2 карданными шарнирами 4, которые используются в автомобилестроении и имеют спецификацию с описанием предельной нагрузки. Основание имеет шесть дополнительных упоров 5, каждый из которых оснащен виброопорой 6. Кабина пользователя имеет органы управления, повторяющие органы управления автомобилем.

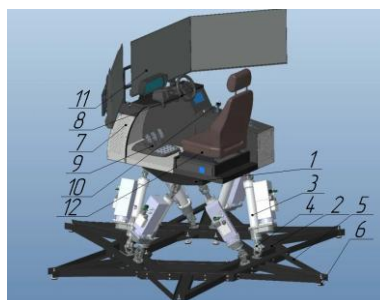


Рис. 6. Цифровой двойник тренажерного комплекса

Основой для закрепления всех элементов является корпус кабины 7, на который закреплены руль 8 и педали 9 являющиеся серийно выпускаемой приставкой с интерфейсом подключения USB. Цифровая приборная панель 9 отображает такую информацию как обороты двигателя, скорость, сигналы поворотов и «Чек Энджин»,

по наличию которого можно определить, что машина заглушена или неисправна. Переключение передач осуществляется электронным селектором коробки передач 10. Вывод изображения симуляции происходит на установленные мониторы 11, которые могут быть выполнены как единым экраном, так и серией экранов меньшей диагонали. Посадка пользователя осуществляется за счет регулируемого кресла 12 со встроенным ремнем безопасности, который необходим для имитации условий эксплуатации автомобиля так и для безопасности при управлении симулятором.

Управление осуществляется от блока управления платформой, содержащего, шесть преобразователей частоты и шесть пультов управления инвертора. Блок управления платформой подключается к ЭВМ через преобразователь USB в CAN. Для разблокировки платформы и ее блокировки (в том числе экстренной) применяется пульт блокировки платформы, находящийся на столе оператора платформы. Для взаимодействия и погружения водителя в среду симуляции разработан программно-аппаратный комплекс «Маршрут», со следующими функциональными возможностями:

- ◆ автоматизированное формирование цифровой модели рельефа (в том числе областей урбанистической застройки) на основе электронных топографических карт, библиотек трехмерных объектов, результатов лазерного сканирования реальных участков местности, данных от мобильных комплексов с прецизионным навигационным оборудованием;
- ◆ создание новых трехмерных объектов;
- ◆ настройка поведенческой модели динамических объектов (интеллектуальных агентов), разработанной с использованием принципов многоагентных систем;
- ◆ создание комплексов упражнений с различными аварийными ситуациями для обучаемых.

Лабораторные испытания прототипа. В соответствии с цифровым двойником платформы, изготовлен прототип тренажерного комплекса с интегрированной системой виртуальных 3D моделей реальной местности на базе предприятия ООО ПФ «Логос» (г. Москва). Характеристики прототипа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики тренажерного комплекса

Параметры	Значения
Амплитуда движений:	
-по крену	±20°
-по тангажу	±20°
-по вертикали	±400 мм
Линейное ускорение	влево-вправо, вверх-вниз: 5 м/с ² вперед-назад: 10 м/с ²
Угловая скорость	до 1,5 рад/с
Грузоподъемность, кг	не менее 800
Тип привода	электрический
Источник электропитания	промышленная сеть ~50 Гц 380В
Средняя потребляемая мощность, кВт	7
Масса, кг	600
Габаритные размеры, мм	3150x2800x1250
Точность позиционирования	1 мм
Интерфейс управления	USB
Количество приводов динамической платформы	6
Рабочая поверхность динамической платформы, не менее	1200×1600

На рис. 7 представлен прототип тренажерного комплекса, который состоит из тренажера (рис. 7,а) и пульта оператора (рис. 7,б). Пульт оператора позволяет производить запуск динамической платформы, задавать карту местности, устанавливать виртуальный автомобиль водителя в заданную точку на карте, а также отслеживать нарушения при прохождении участка.

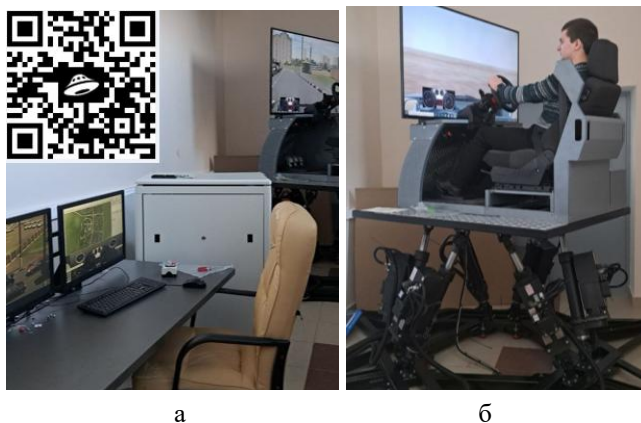


Рис. 7. Прототип тренажёрного комплекса с интегрированной системой виртуальных 3d моделей реальной местности

Для испытания тренажера были выбраны несколько трас с различным уклоном поверхности. В соответствии с наклоном виртуальной модели были проведены сравнения изменения крена и тангажа динамической платформы. В симуляции присутствуют поверхности, движение по которым предполагает больший наклон чем позволяют технические характеристики платформы. В таких условиях платформа достигает крайнего положения расчетной рабочей области и останавливается. Следовательно, для эксплуатации платформы не требуется учитывать рельеф среды симуляции. Другие тесты платформы были направлены на достижение платформой максимальной скорости. Для этого, при помощи пульта инструктора, произведена симуляция падения автомобиля из состояния покоя. В результате актуаторы платформы достигли максимальной скорости. Большую скорость при помощи симуляции достичь невозможно в следствии установленного ограничения.

Проведены тестовые заезды в симуляции полигона, на котором присутствуют препятствия различной сложности, такие как горка и железнодорожный переезд (рис. 8,а,б). На рис. 8,в,г представлены тестовые заезды на дороге в симуляции городских условий. В городе воспроизводится симуляция движения потока, в котором движение автомобилей происходит с разной скоростью. Если машина остается неподвижной, другие участники движения попытаются объехать препятствие. Установленные светофоры регулируют порядок проезда перекрестка. При нарушении правил дорожного движения, автомобиль может попасть в дорожно-транспортное происшествие.

На первом экране (рис. 9,а) инструктора выводится информация о движении обучающегося с видом от третьего лица, на втором экране (рис. 9,б) отображается приборная панель испытуемого, карта маршрута и окно управления платформой.

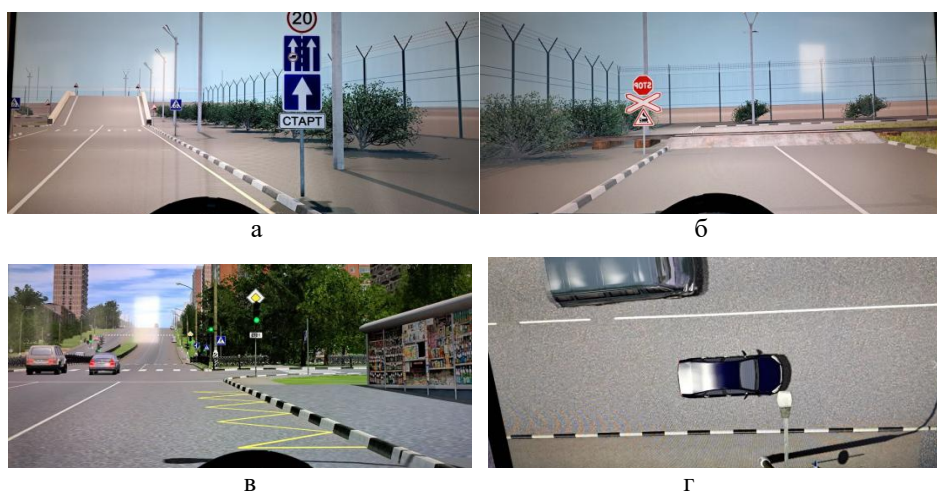


Рис. 8. Тестовые заезды на полигоне и в городских условиях



Рис. 9. Отображение информации на экране инструктора

Заключение. Полученная математическая модель, созданная на основе эволюционных алгоритмов (PSO алгоритм), позволила решить задачу оптимизации геометрических параметров платформы Гофа-Стюарта с учетом минимизации размеров и ограничений на требуемое рабочее пространство и особые положения платформы. В соответствии с полученными геометрическими параметрами расположения и длинами звеньев разработана динамическая модель в программном комплексе MSC Adams. Наибольший пик результирующей суммы сил, приложенных к шарниру, возникает при обработке траектории 3 в момент времени $t=7.78$ и составляет 23,17 кН. Исходя из полученных результатов имитационного моделирования и условий унификации, выполнен подбор приводов и карданных шарниров. Создан цифровой двойник тренажерного комплекса обучения управлению транспортными средствами на базе платформы Гофа-Стюарта при помощи систем автоматизированного проектирования. Изготовлен прототип тренажерного комплекса и проведены испытания. Комплекс оснащен системой виртуальных 3D моделей реальной местности с использованием программно-аппаратного комплекса «Маршрут». Экспериментальные исследования прототипа позволили оценить его возможности и характеристики, скорректировать алгоритмы.

В новой геополитической обстановке импортозамещение становится одной из самых острых проблем экономической безопасности страны в инновационной, оборонной сферах, в связи с чем разработка высокотехнологичных роботизированных устройств, таких как тренажерный комплекс обучения управлению транспортными средствами на базе платформы Гофа-Стюарта, актуальна как никогда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ribeiro P.R., Andre M., Philipp K., Karel K.* A VR Truck Docking Simulator Platform for Developing Personalized Driver Assistance // *Applied Sciences*. – 2021. – P. 8911.
2. *Andres E.G., Tiago K.S., Carlos M.M., Arthur M.N.* Driving Simulator Platform for Development and Evaluation of Safety and Emergency Systems // *Cornell University Library*. – 2018.
3. *Valentino K., Kevin K., Singgih J., Endra D.* Dynamic Models Based Virtual Reality Flight Simulator // *Internetworking Indonesia Journal*. – 2022. – No. 11. – P. 23-28.
4. *Акулов А.С., Железнов К.И., Заболотный А.М., Чабанюк Е.В.* Тренажер для обучения машинистов горных локомотивов // *Рударско-геолошко-нафтни сборник*. – 2022. – С. 27-35
5. *Schmieder H., Nagel K., Schoener H.* Enhancing a Driving Simulator with a 3D-Stereo Projection System. – Stuttgart, 2017.
6. *Chen G., Dian L., Huan C., Haibo C.* Design and Kinematic Analysis of a Novel Flight Simulator Mechanism // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. – 2014.
7. *Zhou X.B., Fan M.Y., Chen X.* Design and implementation of instructors operating station for flight simulator. – 2012.
8. *Obaid M.S., Mebayet S.* Drone controlled real live flight simulator // *Journal of Physics*. – 2021. – P. 0121104.
9. *Gao S., Lei D., Liao Q., Zhang G.* Generalized Stewart-Gough platforms and their direct kinematics // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2005. – P. 141-154.
10. *Landman A., Hoed A., Baelen D., Stroosma O.* A Procedure for Inducing the Leans Illusion in a Hexapod Motion Simulator. – 2021.
11. *Rafal N., Bibianna B., Piotr F.* Susceptibility to Flight Simulator-Induced Spatial Disorientation in Pilots and Non-Pilots // *International Journal of Aviation Psychology*. – 2020. – P. 25-37.
12. *Natarajan E., Venkataramanan A.R., Sasikumar R., Parasuraman S.* Dynamic Analysis of Compliant LEG of a Stewart-Gough Type Parallel Mechanism // *IEEE Student Conference on Research and Development*. – 2019. – P. 123-128.
13. *Hoed A., Landmann A., Baelen D., Stroosma O.* Leans Illusion in Hexapod Simulator Facilitates Erroneous Responses to Artificial Horizon in Airline Pilots // *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. – 2020.
14. *Marinus B.D., Zaal P.M., Pijters M., Stroosma O.* Between-Simulator Comparison of Motion-Filter Order and Break Frequency Effects on Manual Control // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2021. – P. 1-18.
15. *Savona F., Stratual M.A., Diaz E., Honnet V.* The Influence of Lateral, Roll and Yaw Motion Gains on Driving Performance on an Advanced Dynamic Simulator. – Nice, 2014.
16. *Писаренко А., Малышев Д., Рыбак Л., Черкасов В.* Применение эволюционных алгоритмов PSO к задаче оптимизации геометрических параметров мобильной платформы 6-6 ВПЧ // *Компьютерные науки Procedia*. – 2022. – № 213. – С. 643-650.
17. *Merlet J.-P.* Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry // *The International Journal of Robotics Research*. – 1989.
18. *Малышев Д.И., Рыбак Л.А., Писаренко А.С., Черкасов В.В.* Анализ влияния сингулярностей на решение прямой задачи кинематики и геометрию рабочего пространства платформы Гофа-Стюарта // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – С. 152-162.
19. *Малышев Д., Посыпкин М., Рыбак Л., Усов А.* Подходы к определению рабочей зоны параллельных роботов и анализу их геометрических характеристик // *Инженерные операции*. – 2019. – № 67. – С. 333-345.
20. *Рыбак Л., Малышев Д., Гапоненко Е.* Алгоритм оптимизации для аппроксимации множества решений систем нелинейных неравенств в задаче определения рабочего пространства робота // *Коммуникации в области вычислительной техники и информатики*. – 2020. – С. 27-37.

REFERENCES

1. *Ribeiro P.R., Andre M., Philipp K., Karel K.* A VR Truck Docking Simulator Platform for Developing Personalized Driver Assistance, *Applied Sciences*, 2021, pp. 8911.
2. *Andres E.G., Tiago K.S., Carlos M.M., Arthur M.N.* Driving Simulator Platform for Development and Evaluation of Safety and Emergency Systems, *Cornell University Library*, 2018.
3. *Valentino K., Kevin K., Singgih J., Endra D.* Dynamic Models Based Virtual Reality Flight Simulator, *Internetworking Indonesia Journal*, 2022, No. 11, pp. 23-28.

4. Akulov A.S., Zheleznyov K.I., Zabolotnyy A.M., Chabanyuk E.V. Trenazher dlya obucheniya mashinistov gornyykh lokomotivov [Simulator for training mining locomotive drivers], *Rudarsko-geoloshko-naftni sbornik* [Rudarsko-geološko-naftni Zbornik], 2022, pp. 27-35.
5. Schmieder H., Nagel K., Schoener H. Enhancing a Driving Simulator with a 3D-Stereo Projection System. Stuttgart, 2017.
6. Chen G., Dian L., Huan C., Haibo C. Design and Kinematic Analysis of a Novel Flight Simulator Mechanism, *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 2014.
7. Zhou X.B., Fan M.Y., Chen X. Design and implementation of instructors operating station for flight simulator, 2012.
8. Obaid M.S., Mebayet S. Drone controlled real live flight simulator, *Journal of Physics*, 2021, pp. 0121104.
9. Gao S., Lei D., Liao Q., Zhang G. Generalized Stewart-Gough platforms and their direct kinematics, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, pp. 141-154.
10. Landman A., Hoed A., Baelen D., Stroosma O. A Procedure for Inducing the Leans Illusion in a Hexapod Motion Simulator, 2021.
11. Rafal N., Bibianna B., Piotr F. Susceptibility to Flight Simulator-Induced Spatial Disorientation in Pilots and Non-Pilots, *International Journal of Aviation Psychology*, 2020, pp. 25-37.
12. Natarajan E., Venkataramanan A.R., Sasikumar R., Parasuraman S. Dynamic Analysis of Compliant LEG of a Stewart-Gough Type Parallel Mechanism, *IEEE Student Conference on Research and Development*, 2019, pp. 123-128.
13. Hoed A., Landmann A., Baelen D., Stroosma O. Leans Illusion in Hexapod Simulator Facilitates Erroneous Responses to Artificial Horizon in Airline Pilots, *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2020.
14. Marinus B.D., Zaai P.M., Piters M., Stroosma O. Between-Simulator Comparison of Motion-Filter Order and Break Frequency Effects on Manual Control, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, pp. 1-18.
15. Savona F., Stratual M.A., Diaz E., Honnet V. The Influence of Lateral, Roll and Yaw Motion Gains on Driving Performance on an Advanced Dynamic Simulator. Nice, 2014.
16. Pisarenko A., Malyshev D., Rybak L., Cherkasov V. Primenenie evolyutsionnykh algoritmov PSO k zadache optimizatsii geometricheskikh parametrov mobil'noy platformy 6-6 VPS [Application of evolutionary PSO algorithms to the problem of optimization of 6-6 UPU mobility platform geometric parameters], *Komp'yuternye nauki Procedia* [Procedia Computer Science], 2022, No. 213, pp. 643-650.
17. Merlet J.-P. Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry, *The International Journal of Robotics Research*, 1989.
18. Malyshev D.I., Rybak L.A., Pisarenko A.S., Cherkasov V.V. Analiz vliyaniya singulyarnostey na reshenie pryamoy zadachi kinematiki i geometriyu rabocheho prostranstva plat-formy Gofa-Styuarta [Analysis of the influence of singularities on the solution of the direct kinematics problem and the geometry of the workspace of the Gough-Stewart platform], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, pp. 152-162.
19. Malyshev D., Posypkin M., Rybak L., Usov A. Podkhody k opredeleniyu rabochey zony parallelnykh robotov i analizu ikh geometricheskikh kharakteristik [Approaches to the determination of the working area of parallel robots and the analysis of their geometric characteristics], *Inzhenerye operatsii* [Engineering Transactions], 2019, No. 67, pp. 333- 345.
20. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Algoritm optimizatsii dlya approksimatsii mnozhestva resheniy sistem nelineynykh neravenstv v zadache opredeleniya rabocheho prostranstva robota [Optimization Algorithm for Approximating the Solutions Set of Nonlinear Inequalities Systems in the Problem of Determining the Robot Workspace], *Kommunikatsii v oblasti vychislitel'noy tekhniki i informatiki* [Communications in Computer and Information Science], 2020, pp. 27-37.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. С.Ю. Мисюрин.

Волошкин Артём Александрович – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; г. Белгород, Россия; тел.: +79524349277; инженер–исследователь.

Рыбак Лариса Александровна – e-mail: rlbgtu@gmail.com; тел.: +74722230530; д.т.н.; профессор; директор НИИ Робототехники и систем управления.

Малышев Дмитрий Иванович – e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; тел.: +79507134397; м.н.с.

Чуев Кирил Витальевич – e-mail: Kirill.chuev@gmail.com; тел.: +79805288097; инженер.

Скитова Валерия Михайловна – e-mail: Petrenko_lera1995@mail.ru; тел. +79606256006; инженер.

Voloshkin Artem Aleksandrovich – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +79524349277; research engineer.

Rybak Larisa Alexandrovna – e-mail: rlbgtu@gmail.com; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor; director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

Malyshev Dmitry Ivanovich – e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; phone: +79507134397; junior researcher.

Chuev Kirill Vitalievich – e-mail: Kirill.chuev@gmail.com; phone: +79805288097; engineer.

Skitova Valeria Mikhailovna – e-mail: Petrenko_lera1995@mail.ru; phone: +79606256006; research engineer.

УДК 681.51, 62-503.54

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-146-154

С.Ю. Курочкин, А.А. Тачков, Е.И. Борисенков

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрена задача параметрического синтеза системы управления согласованным движением группы мобильных роботов (МР) строем по заданному опорному маршруту. Архитектура системы управления рассматриваемых МР соответствует принципам блочно-модульного построения на основе унифицированных программных компонентов, совместное функционирование которых реализует связующее программное обеспечение, например, Robot Operating System. Стохастическая природа условий применения МР, случайные ошибки в информационно-измерительной системе и использование упрощенных моделей движения МР приводят к возникновению в системе управления МР ошибок, влияющих на скорость его движения. Влияние условий функционирования на качество работы системы связи и системы управления МР отражают вероятностно-временные характеристики (ВВХ): время доставки сообщений в сети и интенсивность остановок МР. Проводимое имитационное моделирование позволяет учесть влияние указанных ВВХ и динамики МР с учетом системы управления приводным уровнем на качество выполнения группой МР поставленной задачи. Согласованное движение группы МР строем по заданному маршруту обеспечивается методом децентрализованной виртуальной структуры. Качество выполнения групповой задачи оценивается двумя показателями: отклонение формы строя от заданной и время выполнения поставленной задачи. Приведен пример вычисления оптимального параметра метода виртуальной структуры, при котором для заданных ВВХ будет обеспечиваться прохождение группой из трех МР опорного маршрута за наименьшее время при минимальных отклонениях текущей формы строя от требуемой. Оптимизационная задача решена при помощи метода золотого сечения, статистическое имитационное моделирование выполнено с использованием пакетов MATLAB Simulink и Parallel Computing Toolbox. Выполнено имитационное моделирование движения однородной группы из трех МР, которой ставится задача движения по маршруту в строю формы «шеренга» с интервалом 5 метров с рекомендуемой скоростью 3 м/с. Качество работы системы автономного управления движением МР обеспечивает безаварийное движение робота с интенсивностью остановок 1,2 остановки в минуту. Система связи и обмена информацией с полностью связной топологией обеспечивает обмен информацией между мобильными роботами с частотой не более 10 Гц, запаздывания в канале связи варьируются в интервале от 0,1 до 0,5 с.

Мобильный робот; группа роботов; групповое управление; имитационное моделирование; система автоматического управления движением.