

Шарнирный механизм с тремя степенями свободы: решение для перехода к модульной робототехнике

Д. Д. Салогуб^{1}*

¹ ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники», г. Москва, Российская Федерация
* e-mail: salogub.d@mail.ru

Аннотация. Конкурентная борьба в области технологического превосходства сегодня в большой степени определяется уровнем развития робототехники, одним из ключевых направлений развития которой по многочисленным данным, является унификация процесса проектирования и конструирования робототехнических систем. Автором статьи была предложена конструкция шарнирного механизма, рабочий орган которого обладает тремя степенями свободы, что позволяет применять такой механизм в широком спектре робототехнических систем путем их количественной комбинации. По результатам выполненной НИР впервые был создан лабораторный макет, выполнены имитационные и натурные исследования. По результатам получены аналитическая и экспериментальная зависимости конструкционных параметров механизма. Разработка на основе шарнирного механизма унифицированного мехатронного модуля создаёт предпосылки для интенсификации развития практической робототехники за счет перехода к алгоритмическим методам проектирования и производства робототехнических комплексов, включающих манипуляторы. Снизит эксплуатационные затраты на всех этапах жизненного цикла продукта, обеспечивая условия для широкого практического применения робототехники.

Ключевые слова: робототехника, шарнирный механизм, мехатронный модуль, унификация, конструирование, развитие

Articulated mechanism with three degrees of freedom: a solution for the transition to modular robotics

D. D. Salogub^{1}*

¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", Moscow, Russian Federation
* e-mail: salogub.d@mail.ru

Abstract. Competitive struggle in the field of technological superiority today is largely determined by the level of development of robotics, one of the key areas of development of which, according to numerous data, is the unification of the process of designing and constructing robotic systems. The author of the article proposed the design of a hinged mechanism, the working body of which has three degrees of freedom, which makes it possible to use such a mechanism in a wide range of robotic systems by means of their quantitative combination. Based on the results of the research work, a laboratory model was created for the first time, simulation and full-scale studies were carried out. Based on the results, analytical and experimental dependences of the design parameters of the mechanism were obtained. The development of a unified mechatronic module based on a hinged mechanism creates the prerequisites for intensifying the development of practical robotics through the transition to algorithmic methods for designing and manufacturing robotic systems, including manipulators. Will reduce operating costs at all stages of the product life cycle, providing conditions for a wide practical application of robotics.

Keywords: robotics, hinged mechanism, mechatronic module, unification, design, development

Зачастую роботы создаются «с нуля». Значит, любая следующая разработка требует большого количества высокооплачиваемого времени разработчиков, производственников, ремонтников. Это сдерживает расширение сфер и объемов практического применения роботов.

Основная функция роботов и манипуляторов, это воспроизводить двигательные функции биологических систем, которые осуществляются во время выполнения тех или иных технологических операций, по большей части имитируют движения верхних и нижних конечностей человека. Задача для механиков состоит в том, чтобы создать механизмы, позволяющие воспроизвести их «технически». Своим техническим решением конструктор должен достигать высокой функциональности и избыточности: способность воспроизводить не два-три, а целый обширный класс движений, что в какой-то степени позволит моделировать универсальность конечностей человека и большое число степеней подвижности исполнительных органов, что именно и обеспечивает высокий уровень функциональности. Высокая функциональность и высокая избыточность, это две главные взаимосвязанные особенности систем робототехники, которые вызывают к жизни большинство связанных с ней научных и практических проблем. Конкурентная борьба в области технологического превосходства сегодня в большой степени определяется уровнем развития робототехники. Важной задачей является разработка исполнительных органов, адаптированных к создаваемому искусственному интеллекту [1]. Особый потенциал несет в себе унификация, особенно в робототехнике военного и специального назначения [2, 3].

Все более осознается необходимость создания универсальных систем, обеспечивающих исполнение широкого круга практически необходимых задач и манипуляций за счёт возможности только перепрограммирования при использовании унифицированных узлов, и модулей для их конструирования.

Уже предложены рынку и внедряются унифицированные шарнирные механизмы. Например, двигатели Колморген, это «шарнир» с одной степенью свободы. Можно отметить и работы по модульности роботов фирмы Acutronic Robotics, правда в области аппаратного обеспечения, которое делает возможной переход к модульной робототехнике [4]. Обзор разработок лидирующих в этой области фирм показывает, актуальность создания унифицированного мехатронного модуля.

Модульность в робототехнике позволяет устранить ряд факторов, сдерживающих её развитие, разрушая устойчивый стереотип о «элитарности» робототехники, который значительно сдерживает привлечение в эту отрасль огромного числа инженерных кадров, парадоксальность возможных предложений которых и в технических решениях, и в прикладном применении потенциально способна обеспечить взрывное развитие робототехники. С этой целью рационально создание и производство мехатронных модулей с заложенным в них избыточным потенциалом движений, реализация которых при практическом применении могла бы осуществляться за счет переключения прилагаемого программного обеспечения.

Рука или нога человека представляет собой пере избыточную разомкнутую кинематическую цепь стержневого типа. Наиболее подвижными являются плечевой и тазобедренный суставы, обеспечивающие перемещение рабочего органа в трех плоскостях.

Обратив внимание, что и плечевой и тазобедренный суставы в первом приближении – это сферические шарниры, такое решение природы было взято нами за основу. Была поставлена цель – создание шарнирного механизма, обеспечивающего не только возможность перемещения рабочего органа, но и его привод. Так, чтобы один такой шарнир был способен заменить любой из суставов только за счет установки соответствующей программы, выбирая одну из 6 стандартных, по количеству видов суставов. Это обеспечивает имитацию движения манипуляторов и протезов конгруэнтно движению имитируемым фрагментам опорно-двигательной системы человека.

Исходной точкой в разработке конструкции послужило известное решение, выполненное в виде сферического сопряжения поверхности которого оснащены плоскими электромагнитами. Выполненная лабораторная реализация этого решения показала его работоспособность. Но по конструкционным характеристикам, выполненный макет не предполагает возможность его практического применения [5].

В процессе выполнения НИР было принято решение сохранить сферическое сопряжение, выполнив три таких сопряжения по принципу матрешки. Предусматривалось использование в качестве энергоносителя либо сжатый воздух, либо жидкость, которые должны были подаваться к приводам, расположенным в местах сопряжения, по каналам, организованным в теле каждой из сфер [6].

Сама конструкция шарнира представляет собой три низшие кинематические пары, обеспечивающие независимое возвратно-поступательное вращение по трем осям, под воздействием давления рабочего тела – жидкости, объединенные в один механизм (рис. 1). Таким образом в конструкцию был интегрирован и привод механизма [7, 8].

Практическая реализация осуществлялась по сборке, выполненной в программе Solidworks с применением технологии SLA/DLP фотополимерным 3D принтером Anycubic Photon MONO X, что позволило изготовить детали, собрать механизм и в лабораторных условиях не только доказать работоспособность конструкционного решения, но и обеспечить исследование его силовых характеристик [9, 10].

В процессе разработки и симулирования работы шарнирного механизма нами были использованы программные приложения Cinema 4D, Solidworks 2019 SP 4.0. и дополнение к Matlab – «Robotics Toolbox» [11]. Первоначально методом программной имитации на базе Cinema 4D, были исследованы рабочая зона одного и двух шарнирных механизмов, соединенных звеном постоянной длины (рис. 2) [12, 13, 14].

Установлено, что рабочая зона предлагаемого шарнирного механизма представляет собой тонкую сферическую оболочку сектора, радиусом равным расстоянию от центра вращения, до рабочего органа, с углом у основания 120°

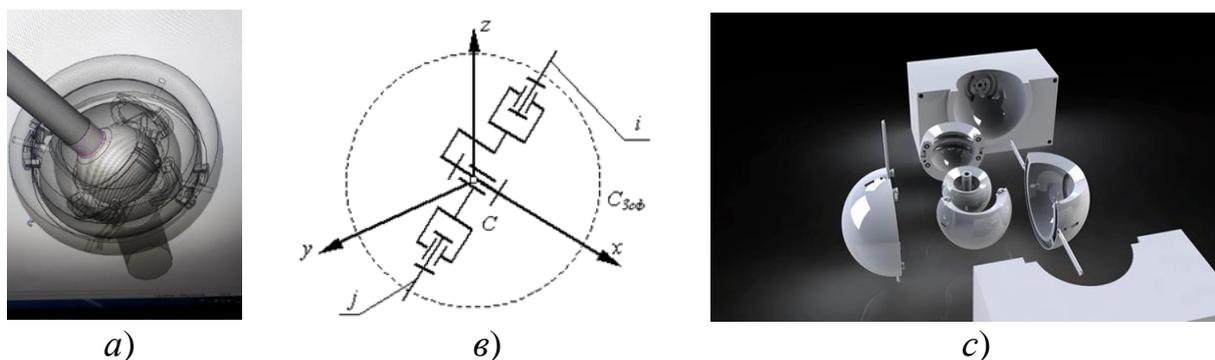


Рис. 1. Конструкция шарнирного механизма:

a) визуализация каналов шарнирного механизма; *б)* эквивалентное кинематическое соединение; *с)* концепт сборки, Solidworks

Установлено, что рабочая зона предлагаемого шарнирного механизма представляет собой тонкую сферическую оболочку сектора, радиусом равным расстоянию от центра вращения, до рабочего органа, с углом у основания 120° .

При работе двух шарнирных механизмов, соединенных связью переменной длины «толщина» рабочего поля будет определяться величиной изменения длины связи.

Следует отметить, что два унифицированных шарнирных механизма, соединенных звеном с возможностью изменения его длины, могут полностью обеспечить работу известных манипуляторов с 7 конструктивными элементами и таким же количеством степеней свободы, значительно сокращая разнообразие конструктивных элементов.

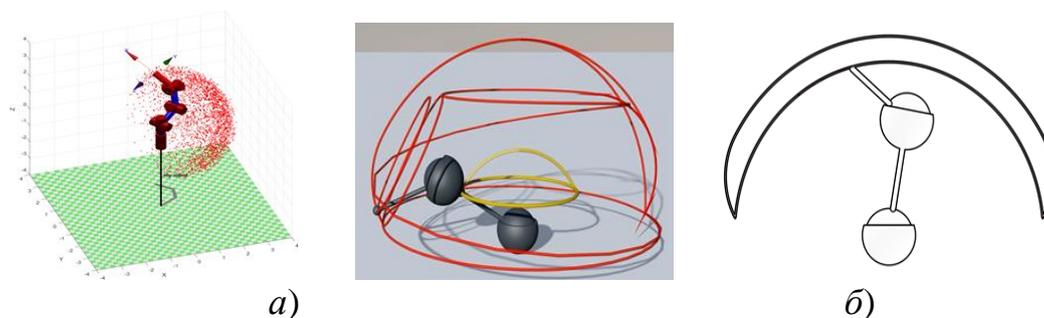


Рис. 2. Симуляция рабочей зоны:

a) «Robotics Toolbox», Matlab; *б)* Cinema 4D, два шарнирных механизма, связь постоянной длины

Программное обеспечение «Robotics Toolbox», Matlab, позволило реализовать решение прямой задачи кинематики для манипулятора, состоящего из трёх механизмов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из двух сопряжений сферических поверхностей, оси вращения которых пересекаются в одном центре. Каждое сопряжение обеспечивало смещение на 60 градусов в обе стороны от вертикального положения.

Особенности программной реализации симуляции процессов как в первом, так и втором случае, не лишены недостатков. В частности - отсутствие возможности моделирования при трёх степенях свободы унифицированного шарнирного механизма.

Это подтвердило необходимость персональной разработки программного решения прямой и обратной задач кинематики для разомкнутого манипулятора с N шарнирами и $N-1$ связями переменной длины [15].

В рамках НИР был создан лабораторный макет шарнирного механизма, позволивший выполнить лабораторные испытания конструкционных характеристик [16].

Определение усилий на рычаге регистрировалось в зависимости от давления рабочего тела. Схема макетного образца, подготовленного для проведения экспериментального определения усилий рабочего органа и схема реакций представлены на рис. 3. [17]. Подача энергоносителя осуществлялась напрямую по гидропроводу 9, через проходной кран 8, в гидроаккумулятор 7, давление в котором контролировалось манометром 6. Трехходовым краном 5 менялось направление перемещения рабочего органа макетного образца шарнирного механизма 1, рабочий орган был выполнен в виде рычага с уравновешенным коромыслом. Упор 3 под одним плечом коромысла ограничивал ход рабочего органа, чтобы ограничить перемещение, освобождая от необходимости при расчётах учитывать векторность измеряемого усилия, а второе плечо присоединялось к динамометру, в нашем случае к электронным весам.

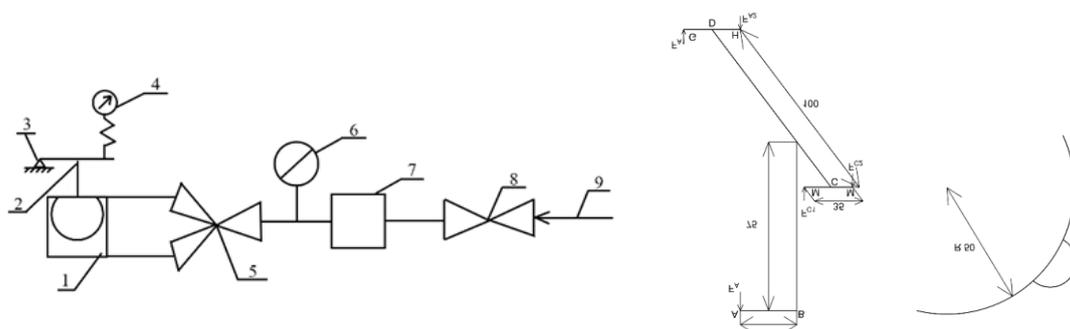


Рис. 3. Схема установки для определения усилий и схема сил

Из схемы (рис. 3) очевидно, что

$$M = 4 S P r, \text{ Нм}, \quad (1)$$

где 4 – количество лопаток, шт., S – рабочая площадь лопатки, м, P – давление жидкости, Па, r – радиус вращения центра инерции рабочей части лопатки, м.

Обработка полученных данных осуществлялась методами математической статистики. Экспериментальные значения усилий на рабочем органе составили выборки, соответственно давлению в системе. Были определены выборочные

средние и дисперсии. Согласие распределений в выборках с нормальным оценивалось по оценкам асимметрии и эксцесса [18–22]. Применение данного критерия было вызвано незначительными объемами выборок. Согласно расчетам, нулевая гипотеза о нормальном распределении была принята для всех выборок. Дополнительная проверка гипотезы однородности дисперсий с применением критериев Фишера-Снедекора, а различия средних выборочных – по критерию Стьюдента, позволила объединить их в одну совокупность. Для аппроксимации функции одной переменной были применены методы регрессионного анализ. По результатам была получена линейная регрессия: $y = 0,77x - 0,47$.

Коэффициент линейной парной корреляции составил – 0.96, коэффициент детерминации – 0.92.

Таким образом, макетные образцы, выполненные с применением аддитивных технологий, позволили осуществить сборку с практической реализацией перемещения рабочего органа и выполнить ряд экспериментов по определению развиваемых рабочим органом усилий. Было зафиксировано, что рабочая зона составила не менее одного стерadiansа, при 3 степенях свободы. Усилие рабочего органа уже при рабочем давлении 70 бар составляет 20 ньютон-метр. Габаритные размеры – диаметром 150 мм. Расчетная точность доставки рабочего органа – от 1,25 мм на 1 метр. Глубина рабочей зоны определяется длиной связи между соединяемыми в манипулятор шарнирами.

Выводы.

1. Решение вопросов унификации является актуальным для отечественной робототехники.

2. Применение предлагаемого шарнирного механизма обеспечивает высокую функциональность разомкнутых кинематических цепей стержневого типа за счёт избыточности, создавая предпосылки для перемещения рабочего органа, конгруэнтно человеческим движениям, обеспечивая возможность установки и работы в ограниченных пространствах и совместно с другими роботами.

3. Конструкционные характеристики шарнирного механизма находятся в практически применимых интервалах.

4. Коэффициент обслуживания манипулятора с тремя шарнирными механизмами равен единице.

5. Необходимо интенсифицировать работы по созданию унифицированного мехатронного модуля на основе разработанного шарнирного механизма.

Автор выражает глубокую благодарность Фонду содействия инновациям, оказавшем финансовую поддержку в реализации выполненного исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Робототехника и ее научные проблемы // Научно-популярный журнал Познавайка. – URL: <https://www.poznavayka.org/nauka-i-tehnika/robototehnika-i-ee-nauchnyie-problemyi/> (дата обращения: 13.12.2021).

2. Стандартизация для унификации процессов создания робототехнических комплексов // Технологии Национальной ассоциации нефтегазового сервиса. – URL: <https://nangs.org/news/technologies/standartizatsiya-dlya-unifikatsii-protsessov-sozdaniya-robototekhnicheskikh-kompleksov> (дата обращения: 13.12.2021).

3. Унификация боевых роботов и модулей вооружения // armsblog.ru военная техника. – URL: <https://zen.yandex.ru/media/armsblog/unifikaciia-boevyh-robotov-i-modulei-vooruzeniia-5cfb99c0ba657800b0cc3d33> (дата обращения: 13.12.2021).
4. Небольшое устройство для унификации робототехники ... // Любители Linux. – URL: <https://www.linuxadictos.com/ru/ros-dispositivo-robotica.html> (дата обращения: 13.12.2021).
5. Salogub Dmitrii, Mecanism articulat al manipulatorului, INVENȚII 4619, B1,MD - BOPI 2/2019.
6. Патент РФ № 2020135880, 31.10.2020. Салогуб Д. Д. Шарнирный механизм манипулятора // RU 2 756 279 C1. 29.09.2021 Бюл. № 28.
7. Салогуб Д. Д. Разработка шарнирного механизма манипулятора, интегрированного с двигателями, обладающего не менее, чем тремя степенями свободы для использования в унифицированных мехатронных модулях, применяемых при конструировании антропоморфных и других робототехнических систем // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020» / Отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов. – Электрон. текстовые дан. Секция «Математика и механика» (1500 Мб.) – М.: МАКС Пресс, 2020.
8. Салогуб Д. Д. Компьютерная графика и 3d-моделирование в процессе разработки шарнирного механизма унифицированного мехатронного модуля с тремя степенями свободы для конструирования робототехнических систем // Инженерная графика и трехмерное моделирование. Молодежная научно-практическая конференция : сб. научных докладов (3 марта 2021 г., Новосибирск). – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – с. 66–72.
9. Салогуб Д. Д., Сарыгин М. С. Проектирование унифицированного мехатронного модуля на базе шарнирного механизма для конструирования робототехнических систем // Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях. Международная научно-практическая конференция: тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2019. – С. 83.
10. Салогуб Д. Д. «Исследование унифицированного шарнирного механизма мехатронного модуля для конструирования робототехнических систем // Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Образование в военно-инженерном деле: теория и практика» Часть II. – Тюмень: ТВВИКУ, 2020. – С. 228
11. Бжихатлов И. А. Моделирование робототехнических систем в программе V-REP. Учебно-Методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 59 с.
12. Салогуб Д. Д. Актуальность решения прямой задачи кинематики для разомкнутого манипулятора с N унифицированными шарнирами, имеющими по 3 степени свободы // Сборник материалов конференции «Ломоносов 2021». https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22120/129748_uid166437_report.pdf (дата обращения 25.03.2022).
13. Салогуб Д. Д., Сарыгин М. С. Исследование рабочей зоны унифицированного шарнирного механизма, интегрированного с двигателями, обеспечивающими не менее трёх степеней свободы // 27-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2020».
14. Салогуб Д. Д. Исследование унифицированного шарнирного механизма мехатронного модуля для конструирования робототехнических систем «МИЭТ» НТИ-2020. Сборник научных трудов Часть 3. – С. 437.
15. Салогуб Д. Д. Исследование унифицированного шарнирного механизма мехатронного модуля для конструирования робототехнических систем // ТВВИКУ. Сборник статей. VII Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Образование в военно-инженерном деле: теория и практика». – С. 228.
16. Салогуб Д. Д., Пьянов И. В. Исследование работоспособности и технологической реализуемости конструкции шарнирного механизма унифицированного мехатронного модуля для робототехнического конструирования // КнАГУ. Сборник материалов IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных Комсомольск-на-Амуре, Часть 2, 12-16 апреля 2021 г.

17. Космодемьянский А. А. Курс теоретической механики / ч. II.-М.: Просвещение, 1956. – 398 с.
18. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
19. Гмурман В. К. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.
20. Лобозкая Н. Л. Основы высшей математики. – Минск: Высшейшая школа, 1978. – 368 с.
21. Герасимович А. И. Математическая статистика / 2-е изд., перераб. И доп. – Минск: Высшейшая школа, 1983. – 279 с.
22. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. – Л.: Наука, 1985. – 112 с.

© Д. Д. Салогуб, 2022