

Методика силового расчета исполнительной группы звеньев антропоморфного робота

Е.А. Дудоров

Научно-производственное объединение «Андроидная техника», ул. Грайвороновская, 23, Москва, Россия
dudorov@npo-at.com

Статья поступила 22.03.2023, принята 28.04.2023

Рассмотрена структурно-кинематическая схема антропоморфного робота, состоящая из модуля корпусного, модулей опорных, модуля головного, модуля системы связи, системы энергообеспечения, системы навигации, системы стабилизации и динамического равновесия, сенсорной системы и бортового вычислителя. Антропоморфный робот обладает следующими основными степенями подвижности: общее количество степеней подвижности — 22 (без учета захватов); общее количество степеней подвижности каждого манипулятора — 8; общее количество степеней подвижности каждого захвата — 6. В статье исследован вопрос методики силового расчета исполнительной группы звеньев захвата антропоморфного робота. В рамках совершенствования антропоморфного захвата рассматривается его несущая способность при взаимодействии с имитаторами ручного инструмента, предназначенного для повседневной деятельности специалистов аварийно-спасательных служб. В качестве имитатора груза при расчете элементов захвата использована спортивная гиря весом 24 кг и диаметром ручки 35 мм, что соответствует большинству применяемого ручного инструмента спасателя. Предлагается подход, основанный на использовании в захвате отдельных приводов для исполнительных групп звеньев, состоящий из четырех повторяющихся идентичных исполнительных групп звеньев и одной отличной от первых исполнительной группы звеньев, закрепленных на основании захвата. Предложенная схема построения индивидуальных приводов позволяет реализовать зависимое управление движением звеньев. В конструкции захвата предусмотрен силомоментный датчик для информационного обеспечения оператора при копирующем управлении антропоморфным роботом. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки перспективных антропоморфных робототехнических комплексов различного назначения, управляемых удаленным оператором и реализующих силомоментное взаимодействие в контуре управления «оператор – робот – среда».

Ключевые слова: антропоморфный робот; технологический макет; исполнительная группа звеньев; копирующее управление; комбинированное управление; силомоментное взаимодействие.

Methodology for power calculation of the executive group of the links of the anthropomorphic robot

E.A. Dudorov

Science and Production Association "Android Technique"; 23, Grayvoronovskaya St., Moscow, Russia
dudorov@npo-at.com

Received 22.03.2023, accepted 28.04.2023

The structural and kinematic scheme of an anthropomorphic robot is considered, consisting of a hull module, support modules, head module, communication system module, energy supply system, navigation system, stabilization and dynamic equilibrium system, sensor system and on-board computer. The anthropomorphic robot has the following main degrees of mobility: the total number of degrees of mobility is 22 (excluding grips); the total number of degrees of mobility of each manipulator is 8; the total number of degrees of mobility of each grip is 6. The article examines the issue of the methodology of power calculation of the executive group of the capture links of an anthropomorphic robot. As part of the improvement of the anthropomorphic grip, its bearing capacity is considered when interacting with simulators of a hand tool designed for the daily activities of emergency services specialists. As an imitator of the load, when calculating the capture elements, a 24 kg sports kettlebell with a 35 mm handle diameter is used, which corresponds to most of the lifeguard's hand tools used. An approach is proposed based on the use of separate actuators for executive groups of links in the capture, consisting of four repeating identical executive groups of links and one different from the first executive group of links fixed on the basis of the capture. The proposed scheme for the construction of individual drives makes it possible to implement dependent control of the movement of links. In the design of the gripper, a force-moment sensor is provided for the information support of the operator during the copying control of an anthropomorphic robot. The results obtained are of practical importance for the development of promising anthropomorphic robotic complexes for various purposes, controlled by a remote operator and implementing force-moment interaction in the control loop "operator - robot - environment".

Keywords: anthropomorphic robot; technological layout; executive group of links; copying control; combined control; force-moment interaction.

Введение. Возникновение природных и технологических катастроф обусловлено наличием биологической, химической, радиационной опасности, опасности обрушения зданий и сооружений, опасности военных разрушений в результате взрывов и др. Проведение ликвидации и аварийно-спасательных работ требует сокращения нахождения людей в опасной для жизни и здоровья зоне. В такой ситуации рационально использовать дистанционно-управляемые робототехнические комплексы (РТК) различного конструктивного исполнения и целевого назначения [1].

Учитывая, что наилучшим исполнителем аварийно-спасательных работ является квалифицированный спасатель, именно его техника выполнения операций и взаимодействия со штатным аварийно-спасательным инструментом должна стать основой для разработки конструкций РТК. Реализация указанных требований возможна только при антропоморфном (человекоподобном) исполнении конструкции робота с захватами, имеющими исполнительную группу звеньев (ИГЗ) имитирующую пальцы кисти человека.

Антропоморфные роботы (АР) в перспективе будут иметь достаточно широкую область применения [2]. Основное назначение — выполнение действий, свойственных и присущих человеку в повседневной деятельности и при реализации сложных технологических операций [3–6]. При этом АР функционируют в техногенной инфраструктуре, изначально ориентированной на габариты и возможности человека. Скелетно-мышечная система человека обеспечивает высокое соотношение развиваемых усилий к массе, достижение аналогичных характеристик в АР при существующем уровне техники не представляется возможным [7]. Это определяет необходимость разработки структурных схем приводов, позволяющих повысить силовые характеристики АР.

В значительной степени в направлении развития антропоморфной робототехники продвинулись исследователи из Японии (ASIMO (Honda)) [8; 9], США (Atlas (Boston Dynamics)) [10; 11], Robonaut (GM) [12], Optimus (Tesla)) [13], Германии (AILA, DLR) [14] и других стран. При этом основные усилия направлены на создание антропоморфных роботов — многодвигательных рычажных механизмов, имеющих кинематическую схему, подобную скелету человека [15; 16]. Это обусловлено в значительной степени тем, что в этом случае необходимо решать широкий комплекс научных и технических задач, имеющих связанный характер.

В России в 2014 г. Фондом перспективных исследований поставлена научно-исследовательская работа «Разработка технологии создания комбинированной системы управления робототехническими комплексами», шифр «Спасатель».

Исполнитель работ — АО «Научно-производственное объединение “Андроидная техника”». Цель работы — разработка технологии комбинированного управления робототехнической платформой на основе элементов сенсорики с обратными связями. Для достижения указанной цели необходимо было решить ряд ключевых задач:

- Обосновать технические решения и характеристики АР с комбинированной системой дистанционного управления на основе элементов сенсорики с обратными связями.

- Разработать технологии комбинированного управления АР, обеспечивающие считывание и передачу моторики и голоса оператора для формирования команд управления.

- Разработать сенсорную систему АР, обеспечивающую сбор, передачу данных от АР к оператору, реализацию «эффекта присутствия» для оператора.

- Разработать демонстрационный образец АР и провести испытания.

В процессе выполнения первого этапа НИР «Спасатель» разработаны и изготовлены технологические макеты (ТМ) антропоморфных роботов № 1–6, на которых проводились отработка и верификация технологий комбинированного управления. Общий вид ТМ № 1–6 представлен на рис. 1.

ТМ № 1–5 имеют антропоморфную структуру и выполнены на модульном принципе. Модули манипуляторные имеют 7 степеней подвижности с кинематическими характеристиками, аналогичными руке человека, и контролем нагрузок в соединении захватного устройства с манипулятором. В ТМ № 1 введена дополнительная подвижность на каждый манипулятор. В ТМ № 2–5 выполнен ряд педипуляторных модулей с числом степеней подвижности от 5 до 6. Корпусные модули обладают двумя степенями подвижности. Захватные модули, реализующие групповой привод, выполнены с 6-ю степенями подвижности, а при применении индивидуальных приводов (ТМ № 5) — с 12-ю степенями подвижности.

ТМ № 6 — задающее устройство копирующего типа (ЗУКТ), предназначено для отработки технологии копирующего режима управления АР. Обеспечивает регистрацию и передачу моторики оператора для формирования команд управления, в том числе с обратной силовой связью.

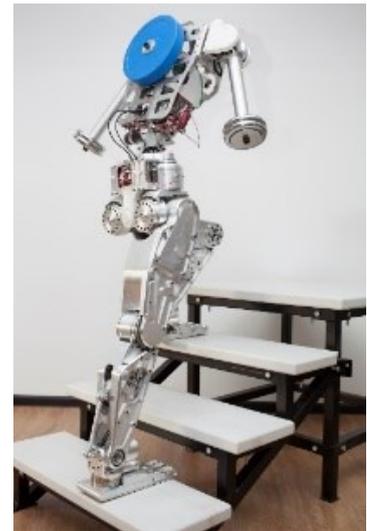
В соответствии с темой публикации дальнейшее рассмотрение методики расчета силового взаимодействия антропоморфного захвата будет производиться на примере конструкции ТМ № 1.



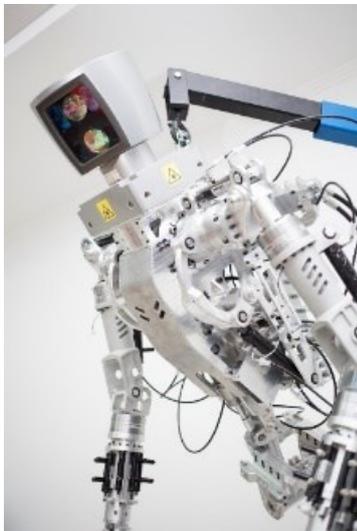
а



б



в



г



д



е

Рис. 1. Общий вид технологических макетов: а — ТМ № 1; б — ТМ № 2; в — ТМ № 3; г — ТМ № 4; д — ТМ № 5; е — ТМ № 6

Структурно-кинематические характеристики технологического макета АР. Для отработки технологий точной моторики и силомоментного взаимодействия посредством копирующего управления ТМ № 1 захватывающим устройством копирующего типа ТМ № 6 была реализована конструктивная схема ТМ № 1 (рис. 2) и структурная схема ТМ № 1 (рис. 3).

Состав ТМ № 1: модуль корпусной, модули опорные, модуль головной, модуль системы связи платформы, система энергообеспечения платформы, система навигации, система стабилизации и динамического равновесия, система сенсорная платформы, бортовой вычислительный комплекс.

В качестве приводов в ТМ № 1 использованы электрические двигатели коллекторного типа. Отличительной чертой этих двигателей являются малые габаритные размеры при высоких удельных характеристиках. В манипуляторах подвижность реализована за счет использования планетарных мотор-редукторов, а также

комбинации из коллекторного электродвигателя и волнового редуктора, связанных между собой через шкивы с ременной передачей.

Для ИГЗ захвата используются комбинация электродвигателя со встроенной шариковинтовой парой (ШВП) на выходном валу электродвигателя [17; 18]. Съём информации о силовом воздействии на захват и ИГЗ осуществляется за счет установленных силомоментных датчиков (ТФ сенсоров) в модулях захватных и на первых звеньях модулей манипуляторов [19].

ТМ № 1 обладает следующими основными степенями подвижности:

- общее количество степеней подвижности платформы — 22 (без учета захватов);
- общее количество степеней подвижности каждого манипулятора — 8;
- общее количество степеней подвижности каждого захвата — 6.

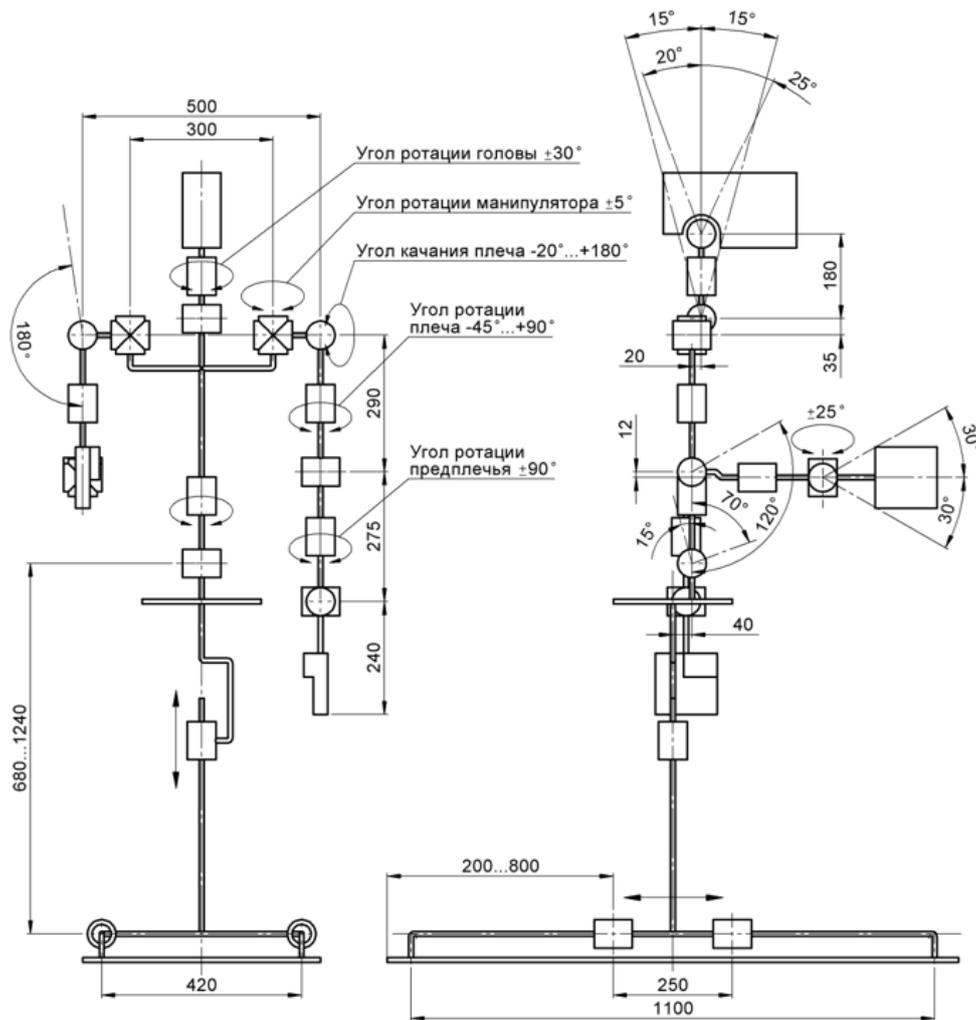


Рис. 2. Технологический макет № 1. Конструктивная схема

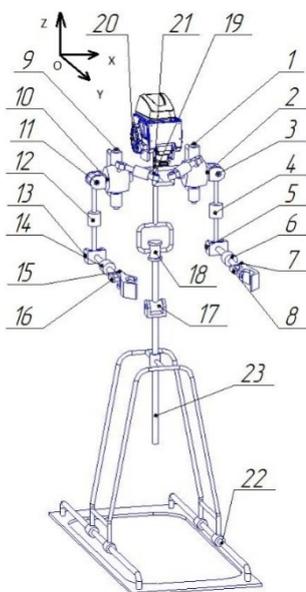


Рис. 3. Технологический макет № 1. Структурная схема

Технические характеристики ТМ № 1 с указанием наименования степени подвижности, передаточного числа редуктора и углов поворотов осей представлены в табл. 1.

Способ взаимодействия захвата с инструментом.

Взаимодействие ТМ № 1 с имитаторами штатного инструмента спасателя осуществлялось с помощью захвата манипулятора, кинематическая схема которого представлена на рис. 4.

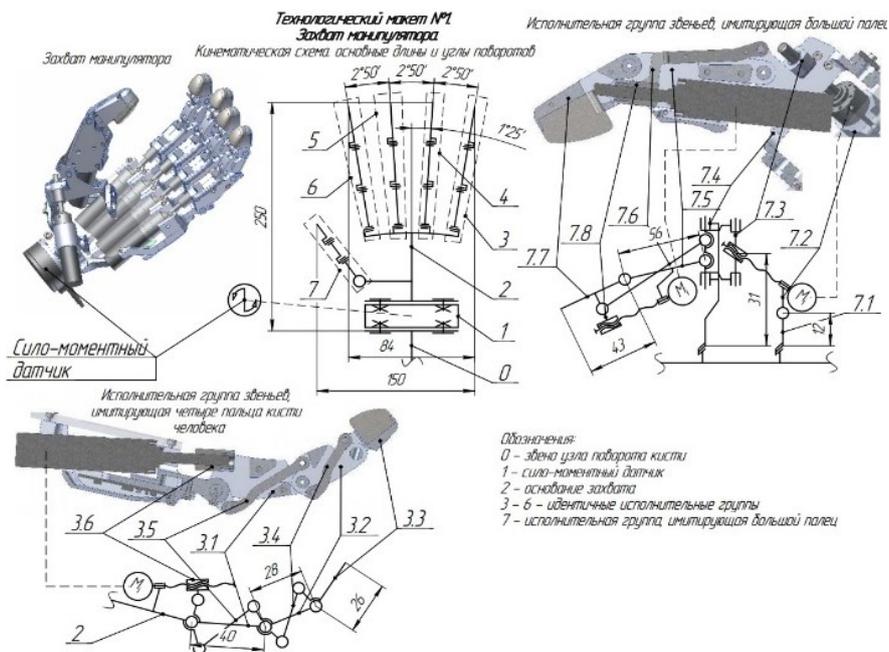
Захват манипулятора ТМ № 1 в своей конструкции имеет:

- звено узла поворота кисти, обеспечивающее присоединение захвата к основанию манипулятора ТМ № 1 и его поворот относительно манипулятора;
- силомоментный датчик, позволяющий контролировать действующую на кисть нагрузку при взаимодействии с инструментом;
- основание захвата, на котором размещаются ИГЗ с электроприводами и контроллерами для их управления;
- четыре ИГЗ с индивидуальными электроприводами, имитирующие четыре пальца кисти человека;
- ИГЗ с одним электроприводом для сжатия и вторым электроприводом для подвода и отвода ИГЗ к основанию захвата.

В качестве электроприводов ИГЗ используется сборка коллекторного электродвигателя Maxon Motor в комбинации с шарико-винтовой парой (ШВП). Технические характеристики электропривода с ШВП представлены в табл. 2.

Таблица 1. Технические характеристики приводов (рис. 3)

№ поз.	Наименование степени подвижности	Передаточное число	Углы поворота, град.
1,9	Качание плеча хоу	16	-3,5...5,5
2, 10	Качание плеча уоу	100	0...180
3, 11	Качание плеча хоз	100	-20...180
4, 12	Ротация плеча	160	-45...90
5, 13	Сгиб локтя	100	0...120
6, 14	Ротация предплечья	230	-90...90
7, 15	Качание захвата хоз		-20...20
8, 16	Качание захвата хоу		-20...20
17	Наклон модуля корпусного	100	-15...70
18	Ротация модуля корпусного	120	-30...+30
19	Наклон шеи	100	-15...15
20	Наклон головы	-	-
21	Поворот головы	-	-
22	Перемещение основания оу	-	-
23	Перемещение основания оз	-	-

**Рис. 4.** Кинематическая схема захвата ТМ № 1**Таблица 2.** Технические характеристики электропривода с ШВП

Характеристика	Значение
Редуцирование	4,4:1
Максимальная скорость подачи, мм/с	90,9
Максимальное усилие постоянное, Н	64
Максимальное усилие прерывистое, Н	176

Контроль положения ИГЗ осуществлялся датчиком положения AS 5045. Управление осуществляется контроллерами NEW MC производства НПО «Андроидная техника».

Расчет и обоснование выбранных конструктивных решений захвата манипулятора. Расчет элемен-

тов захвата проведем на примере взаимодействия и нагружения при подъеме спортивной гири весом 24 кг и диаметром ручки 35 мм, что соответствует большинству применяемого ручного инструмента спасателя.

Схема для расчета конструкции представлена на рис. 5.

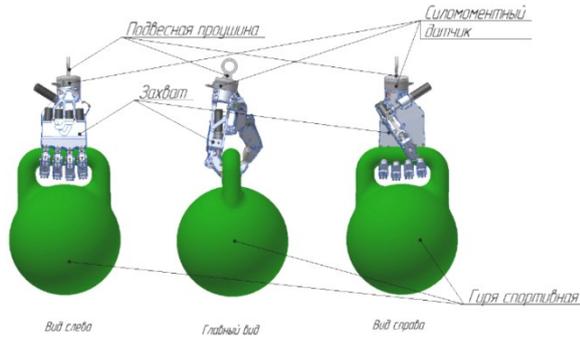


Рис. 5. Эскиз закрепления захвата на гире

При данной схеме захват, зафиксированный на гире ИГЗ оттягивается за проушину, закрепленную на основании захвата через силомоментный датчик, вверх.

Расчет выполняется для определения соответствия прочностных характеристик конструкции захвата, а также приводов качания захвата относительно манипулятора.

Общая схема нагружения представлена на рис. 6, где mg — вес груза, H ; $F_{ин}$ — сила инерции, H ; V — скорость подъема всей системы, $м/с$; a — ускорение подъема всей системы, $м/с^2$.

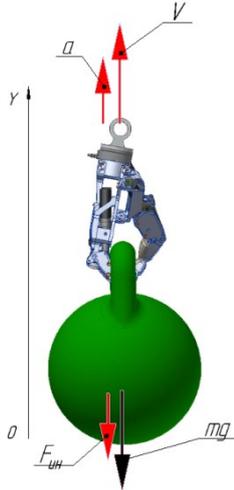


Рис. 6. Общая схема нагружения

Растяжением троса и прочими упругими взаимодействиями в захвате пренебрегаем. Четыре идентичных ИРЗ одинаково охватывают ручку гири, следовательно, нагрузка равно распределена между ними.

Рассмотрим схему нагружения захвата с позиции точек контакта с гирей более подробно, как показано на рис. 7.

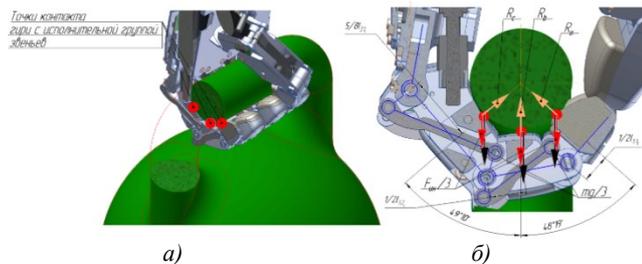


Рис. 7. Определение точек соприкосновения захвата с гирей: а — общий вид; б — распределение нагрузок на ИГЗ

ИГЗ захвата имеет 3 точки соприкосновения с ручкой гири. На рис. 7, б показано распределение внешней нагрузки на исполнительную группу, где R_a, R_b, R_c — реакции опоры со стороны звеньев на ручку гири. Массами частей ИГЗ пренебрегаем.

Наиболее ответственными элементами захвата являются места шарнирных соединений ИГЗ, крепление их к корпусу захвата, крепление электроприводов к корпусу захвата, крепление гаек ШВП к ИГЗ и реактивные тяги захватов (3.4с и 3.5с — рис. 4).

Расчет элементов захвата. Расчет вышеописанных элементов конструкции захвата проведем, исходя из схемы нагружения ИГЗ, как показано на рис. 8.

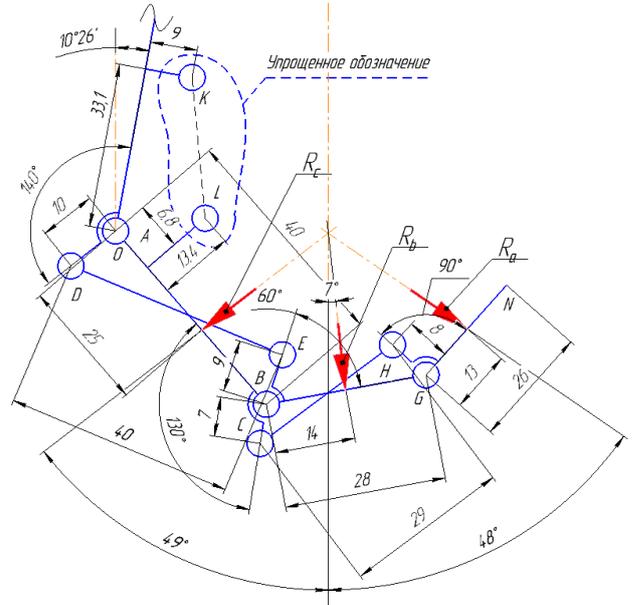


Рис. 8. Расчетная схема для определения реакций в шарнирах

Нагрузка, приходящаяся на каждую из трех охватывающих гирю исполнительных групп, равна:

$$R_i = \frac{m_{гиря} * g}{a} * \cos(\alpha_i), H, \quad (1)$$

где $m_{гиря}$ — масса гири, кг; g — ускорение свободного падения, $м/с^2$; a — ускорение при подъеме, $м/с^2$; α_i — угол реакции опоры ИГЗ при охвате.

Определим силы инерции, возникающие при подъеме груза:

$$F_{ини} = \frac{R_i}{g} * a, H. \quad (2)$$

Согласно схеме нагружения, учитывая углы реакций опор, определим совместную весовую и инерционную нагрузку:

$$R_{i1} = R_i + F_{ини} * \cos(\alpha_i), H. \quad (3)$$

Для определения приведенной силы на гайке ШВП ИГЗ звеньев захвата составим условный план скоростей (рис. 9). Положение механизма на плане скоростей соответствует охвату гири, как показано на рис. 7.

Составим условный план рычага Жуковского. Для этого приложим к условному плану скоростей внешние нагрузки, повернутые на 90° по направлению вращения первого подвижного звена ИГЗ. Условный план рычага Жуковского представлен на рис. 10.

Определим приведенную силу на гайке ШВП ИГЗ:

$$F_{\text{п.р.}} = \frac{R_{a1} * L_a + R_{b1} * L_b + R_{c1} * L_c}{L_L}, \text{ Н}, \quad (4)$$

где L_L — длина плеча приложения силы, м.

Самыми нагруженными осями являются L и K, так как на них приходится приведенная сила.

Определили предельно допустимые нагрузки на оси ИГЗ:

$$F_{\text{доп.и}} = S_i * [\tau_{\text{с.р.}}], \text{ Н}, \quad (5)$$

где S_i — площади осей, мм^2 ; $[\tau_{\text{с.р.}}]$ — временное сопротивление разрыву материала осей при комнатной температуре (20°C), Н/мм^2 .

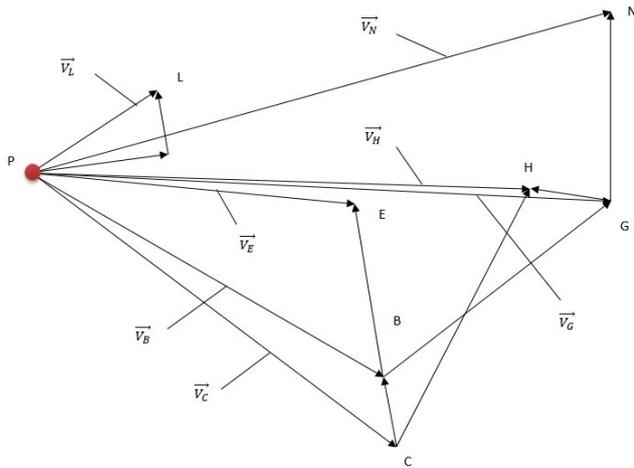


Рис. 9. Условный план скоростей ИГЗ при охвате гири

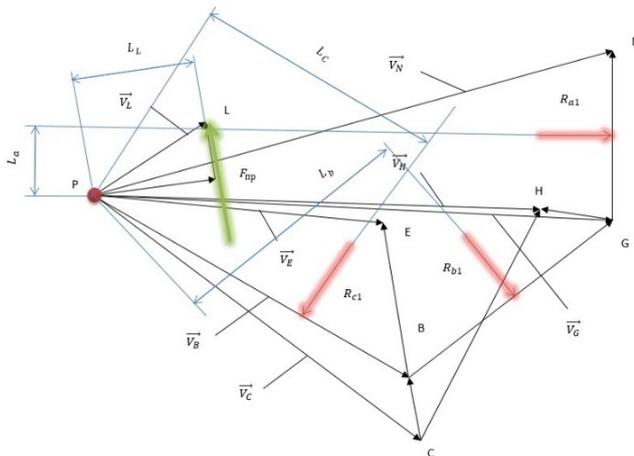


Рис. 10. Условный план рычага Жуковского для ИГЗ при охвате гири

Расчет параметров привода ИГЗ. Привод ИГЗ захвата представляет собой шариковинтовую передачу, соединенную соосно через планетарный редуктор с электродвигателем.

Необходимый крутящий момент двигателя определяем по формуле:

$$M_{\text{к.р.д.в.}} = \frac{F_{\text{п.р.}} * P}{2 * \pi * \eta} * \frac{1}{U_{\text{р.е.д}}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{к.р.д.в.}}$ — необходимый крутящий момент на электродвигателе, Н*м ; $F_{\text{п.р.}}$ — приведенная сила на

гайке, H ; P — шаг винта, м ; η — КПД передачи; $U_{\text{р.е.д}}$ — передаточное число планетарной передачи.

Полученный крутящий момент должен быть меньше номинального крутящего момента принятого электродвигателя примерно в 8...10 раз.

Следовательно, при переносе тяжелого ручного инструмента приводы ИГЗ должны быть остановлены в результате реализации управления системы передачи движения звеньям исполнительных групп захвата.

Работа приводов захвата без и при совместном перемещении с манипулятором допустима с грузом, равным 10-й части принятой массы имитатора инструмента ($m_{\text{доп.}} = 2,4 \text{ кг}$) с ускорением до 3 м/с^2 .

Заключение. Научно-исследовательская работа «Разработка технологии создания комбинированной системы управления робототехническими комплексами», шифр «Спасатель», поставлена Фондом перспективных исследований и выполнена АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника»» в кооперации с другими научно-инженерными учреждениями. По мнению автора, впервые исследован целый ряд технологий и конструкций антропоморфных робототехнических комплексов различного исполнения.

Приведенный пример методики силового расчета лег в основу вычисления параметров ИГЗ для АР самого разного исполнения и назначения как для применения в научно-исследовательской деятельности [20], так и при создании АР для космического эксперимента на борту международной космической станции [21].

Стоит отметить, что ТМ № 1 передан Фондом перспективных исследований в ГК «Роскосмос» и является составной частью универсального компьютерного стенда робототехнических систем (УКС РТС) в ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина» [22]. В настоящее время на УКС РТС космонавты проходят обучение методам и технологиям управления АР с помощью ЗУКТ [23].

В перспективе технологии управления, наработанные на УКС РТС, обеспечат создание дистанционно управляемых антропоморфных робототехнических комплексов, которые смогут полностью заменить человека во всех сферах деятельности при выполнении работ в условиях радиационного, химического и биологического заражения с применением штатного оборудования и инструментов.

Технологии дистанционного копирующего управления с обратной силомоментной связью и выполнения работ с общим и специализированным инструментом планируются к внедрению в антропоморфных робототехнических комплексах космического назначения для внутрикорабельной и внекорабельной деятельности в рамках перспективных орбитальных и лунных программ.

Литература

1. Качанов С.А. Перспективы применения робототехнических комплексов в международных гуманитарных операциях // I Междунар. науч.-практическая конф. по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности (19 окт. 2021 г.). М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2021. С. 68-74.
2. Кочеткова Е.В. Тенденции развития антропоморфной робототехники // Концепции. 2022. № 1 (41). С. 39-52.
3. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф. Робот космического назначения как составляющая научной аппаратуры // Пилотируемые полеты в космос. 2018. № 3 (28). С. 83-96.
4. Пермяков А.Ф., Дудоров Е.А., Сохин И.Г., Шпонько А.А. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «ФЕДОР» // Сварочное производство. 2021. № 3. С. 53-60.
5. Дудоров Е.А. Робототехнические системы космического назначения // Космическая техника и технологии. 2022. № 3 (38). С. 66-81.
6. Дудоров Е.А., Сохин И.Г. Предназначение и задачи робототехнических систем в российской лунной программе // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 2020. № 12 (729). С. 3-15.
7. Дикарев В.А., Симбаев А.Н., Кикина А.Ю. Проблема обеспечения соответствия кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ // Пилотируемые полеты в космос. 2022. № 4 (45). С. 54-71.
8. Chestnutt J., Lau M., Cheung G. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. Conference: Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on.
9. Hammam G.B., Orin D.E., Dariush B. Whole-body humanoid control from upper-body task specifications // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2010 (3-7 мая 2010 г.) Anchorage, AK, 2010. P. 3398-3405.
10. Atmeh G.M., Ranatunga I., Subbarao K. Implementation of an adaptive, model free, learning controller on the Atlas robot // Proceedings of the American Control Conference, Portland, OR (4-6 June's 2014 y.) Portland, OR, 2014. P. 2887-2892.
11. Kuindersma S., Deits R., Fallon M. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. Autonomous Robots 40 (3), July 2015.
12. Bluethmann W., Ambrose R., Diftler M. Robonaut: A Robot Designed to Work with Humans in Space. 2003. V. 14. № 2-3. P. 179-197.
13. Friz A.P. Applying the TAII Framework on Tesla Bot. December 20th, 2021.
14. Lemburg J., Gea Fernandez J., Eich M., Mronga D. AILA - Design of an autonomous mobile dual-arm robot. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Conference: IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011, Shanghai, China (9-13 May 2011 y.).
15. Bogdanov A., Dudorov E., Permyakov A. Control system of a manipulator of the anthropomorphic robot Fedor // Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE: 12th International Conference on the Developments in eSystems Engineering, DeSE 2019, Kazan (7-10 oct. 2019 y.). Kazan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 449-453.
16. Bogdanov A., Permyakov A., Yezhikova Y. Research of kinematics of an actuating group of an anthropomorphic gripper with a common drive // MATEC Web of Conferences: 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol (10-14 sept. 2018 y.). V. 224. Sevastopol: EDP Sciences, 2018. P. 01029.
17. Жданова Ю.И., Дудоров Е.А., Богданов А.А. Обоснование структурной схемы исполнительной группы антропоморфного захвата с групповым приводом и адаптивным управлением движения звеньев // Изв. высш. учеб. заведений. Северо - Кавказский регион. Технические науки. 2022. № 2 (214). С. 20-26.
18. Чижиков В.И., Моргуненко К.О., Воробьев Е.И. Тактильная аппроксимация формы объекта пятипалой кистью руки антропоморфного робота // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (МНТК ФТИ-2017): сб. науч. тр. (6-7 апр. 2017 г.). М.: МИРЭА, 2017. С. 136-139.
19. Арасланов М.С., Пронин А.А., Богданов А.А. Программный комплекс отображения силового взаимодействия захвата антропоморфного робота на кисть оператора: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016660282 Рос. Федерация; заявл. 12.07.2016; опубл. 12.09.2016.
20. Шушляпин Е.А., Безуглая А.Е. Управление антропоморфным роботом методом конечного состояния // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2019. № 3 (7). С. 38-47.
21. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф. Космический эксперимент с антропоморфным роботом // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 552-554.
22. Дудоров Е.А. Имитационно-моделирующие программно-аппаратные комплексы тренировки операторов робототехнических комплексов // Пилотируемые полеты в космос: материалы XIV Междунар. науч.-практической конф. (17-19 нояб. 2021 г.). Звездный городок: Науч.-исслед. испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, 2021. С. 35.
23. Дикарев В.А., Чеботарев Ю.С. Разработка элементов коллаборативного взаимодействия космонавтов с робототехническими системами для пилотируемых космических полетов // Идеи и новации. 2022. Т. 10. № 1-2. С. 99-103.

References

1. Kachanov S.A. Prospects for the use of robotic complexes in international humanitarian operations // I Mezhdunar. nauch.-prakticheskaya konf. po razvitiyu robototekhniki v oblasti obespecheniya bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti (19 okt. 2021 g.). M.: Vseros. nauch.-issled. in-t po problemam grazhdanskoj oborony i chrezvychajnyh situacij MCHS Rossii, 2021. P. 68-74.
2. Kochetkova E.V. Trends in the development of anthropomorphic robotics // Konceptii. 2022. № 1 (41). P. 39-52.
3. Bogdanov A.A., Kutlubayev I.M., Permyakov A.F. A robot for space purposes as a component of scientific equipment // Manned Spaceflight. 2018. № 3 (28). P. 83-96.
4. Permyakov A.F., Dudorov E.A., Sohin I.G., SHpon'ko A.A. Preparation and conduct of a space experiment using an anthropomorphic robot "FEDOR" // Welding International. 2021. № 3. P. 53-60.
5. Dudorov E.A. Robotic systems for space purposes // Space Engineering and Technologies. 2022. № 3 (38). P. 66-81.
6. Dudorov E.A., Sohin I.G. The purpose and tasks of robotic systems in the Russian lunar program // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2020. № 12 (729). P. 3-15.
7. Dikarev V.A., Simbaev A.N., Kikina A.YU. The problem of ensuring compliance of kinematic characteristics of actuators and control devices of anthropomorphic robotic systems for

- prospective manned space programs // *Manned Spaceflight*. 2022. № 4 (45). P. 54-71.
8. Chestnutt J., Lau M., Cheung G. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. Conference: Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on.
 9. Hammam G.B., Orin D.E., Dariush B. Whole-body humanoid control from upper-body task specifications // *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2010 (3-7 may 2010 y.) Anchorage, AK, 2010*. P. 3398-3405.
 10. Atmeh G.M., Ranatunga I., Subbarao K. Implementation of an adaptive, model free, learning controller on the Atlas robot // *Proceedings of the American Control Conference, Portland, OR (4-6 june's 2014 u.) Portland, OR, 2014*. P. 2887-2892.
 11. Kuindersma S., Deits R., Fallon M. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots* 40 (3), July 2015.
 12. Bluethmann W., Ambrose R., Diftler M. Robonaut: A Robot Designed to Work with Humans in Space. 2003. V. 14. № 2-3. P. 179-197.
 13. Friz A.P. Applying the TAIL Framework on Tesla Bot. December 20th, 2021.
 14. Lemburg J., Gea Fernandez J., Eich M., Mronga D. AILA - Design of an autonomous mobile dual-arm robot. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Conference: IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011, Shanghai, China (9-13 May 2011 u.)*.
 15. Bogdanov A., Dudorov E., Permyakov A. Control system of a manipulator of the anthropomorphic robot Fedor // *Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE: 12th International Conference on the Developments in eSystems Engineering, DeSE 2019, Kazan (7-10 oct. 2019 u.)*. Kazan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 449-453.
 16. Bogdanov A., Permyakov A., Zhdanova Y. Research of kinematics of an actuating group of an anthropomorphic gripper with a common drive // *MATEC Web of Conferences: 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol (10-14 sert. 2018 u.)*. V. 224. Sevastopol: EDP Sciences, 2018. P. 01029.
 17. Zhdanova YU.I., Dudorov E.A., Bogdanov A.A. Substantiation of the structural scheme of the executive group of anthropomorphic capture with group drive and adaptive control of the movement of links // *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2022. № 2 (214). P. 20-26.
 18. CHizhikov V.I., Morgunenko K.O., Vorob'ev E.I. Tactile approximation of the shape of an object with a five-fingered hand of an anthropomorphic robot // *Informatika i tekhnologii. Innovacionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike (MNTK FTI-2017): sb. nauch. tr. (6-7 apr. 2017 g.)*. M.: MIREA, 2017. P. 136-139.
 19. Araslanov M.S., Pronin A.A., Bogdanov A.A. The software package for displaying the force interaction of the capture of an anthropomorphic robot on the operator's brush: svydetel'stvo o gos. registracii programmy dlya EVM № 2016660282 Ros. Federaciya; zayavl. 12.07.2016; opubl. 12.09.2016.
 20. SHushlyapin E.A., Bezuglaya A.E. Control of an anthropomorphic robot by the finite state method // *Automation and measurement in machine and instrument engineering*. 2019. № 3 (7). P. 38-47.
 21. Bogdanov A.A., Kutlubaev I.M., Permyakov A.F. Space experiment with an anthropomorphic robot // *Reshetnevskie chteniya*. 2017. V. 1. P. 552-554.
 22. Dudorov E.A. Simulation-modeling software and hardware complexes for training operators of robotic complexes // *Pilotiruemye polety v kosmos: materialy XIV Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (17-19 noyab. 2021 g.)*. Zvezdnyj gorodok: Nauch.-issled. ispytatel'nyj centr podgotovki kosmonavtov im. YU.A. Gagarina, 2021. P. 35.
 23. Dikarev V.A., CHEbotarev YU.S. Development of elements of collaborative interaction of astronauts with robotic systems for manned space flights // *Idei i novacii (Ideas and innovations)*. 2022. V. 10. № 1-2. P. 99-103.