

Машиностроение. Металлургия



DOI 10.52209/1609-1825_2024_2_3

УДК 621.01

Оценка прочности конструкции шасси многоцелевого разведывательного робота с искусственным интеллектом

¹***АХМЕТОВ Кайрат Телектесович**, PhD, доцент, kairat.telektesovich@gmail.com,

¹**АТАНОВ Сабыржан Кобейсинович**, д.т.н., профессор, atanov5@mail.ru,

¹**МОЛДАМУРАТ Хуралай**, к.т.н., доцент, moldamurat@yandex.kz,

¹**БАЙМАНОВА Ажар Булатқызы**, магистрант, baimanova.a@mail.ru,

¹**СЕЙТБАТТАЛОВ Жексен Ермекул**, старший преподаватель, jeks_sbt@mail.ru,

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Рассмотрены вопросы прочности конструкции шасси многоцелевого разведывательного робота. Объектом исследования является деталь узла поворота, представляющая собой ABS пластик. Для данной детали впервые определены параметры поперечных сил и изгибающих моментов в зависимости от заданных внешних распределенных нагрузок 0,125 до 2,5 кН/м. Определены оптимальные предельные значения прочности на изгиб и поперечные силы, возникающие при нагружении распределительных нагрузок. Для определения угла поворота вала и поперечного смещения (прогиб) применен метод начальных параметров, значения которого составило 6° и 1 мм, что является приемлемым результатом для данного типа робота-разведчика колесного типа. Для достоверности полученных теоретических результатов дополнительно было применено компьютерное моделирование на смещение поперечного сечения вала. В ходе анализа были выявлены незначительные отклонения от теоретических показателей, что позволило сделать вывод о правильности проведенных расчетов.

Ключевые слова: робот-разведчик, метод начальных параметров, прочность, поперечные силы, изгибающий момент.

Введение

Для начала следует задаться вопросом, что представляет собой робот-разведчик и для чего он служит? Многоцелевой робот-разведчик с искусственным интеллектом (ИИ) предназначен для выполнения множества задач, связанных со сбором, анализом и принятием решений данных в различных средах. Конкретные задачи, которые может выполнять такой робот, зависят от его конструкции, возможностей и целей миссии [1-2]. Основными задачами, которые может выполнять робот-разведчик, является наблюдение, т.е. робот может быть оснащен камерами и датчиками для наблюдения и сбора информации об окружающей среде, таких как температура, влажность, качество воздуха и уровень радиации [3-4]. За счет встроенной системы ИИ робот-разведчик используется в поиске и спасении пропавших без вести людей в пострадавших от стихийных бедствий. Он может распознавать обломки и перемещаться среди них, обнаруживать признаки жизни и общаться с людьми, осуществляющими реагирование. Применяется в картировании и создании подробных карт неизведанных или опасных территорий [5, 6]. ИИ может помочь в составлении карт в реальном времени и принятии решений на основе собранных данных. В случае с обращением с опасными материалами робот-разведчик может транспортировать опасные материалы в средах, где это небезопасно для людей. Робот может быть оснащен соответствующими датчиками для обнаружения и безопасного обращения с такими материалами. Кроме этого, робот может распознавать и классифицировать объекты с использованием компьютерного зрения [7, 8]. Это может быть полезно в военных целях и службах безопасности. Также может выступать в качестве ретрансляционной станции мобильной связи в районах с плохими или нарушенными сетями связи. Использование автономной навигации с ИИ позволяет роботу-разведчику самостоятельно обходить препятствия, а также планировать маршруты и адаптироваться к динамическим изменениям окружающей среды. Робот позволяет осуществлять анализ данных и принятие решений собираемых данных в режиме реального времени. Он может выявлять закономерности, аномалии или потенциальные угрозы и принимать обоснованные решения на основе этого анализа [9]. Управляться операторами, выполняя их команды, либо предоставляя им идеи и информацию для принятия обоснованных решений. Дистанционное управление позволяет удаленным операторам управлять роботом, когда это необходимо, особенно в ситуациях, требующих

человеческого решения или вмешательства. Хранение, сбор и передача данных для будущего анализа или архивирования. В военных целях и в сфере безопасности его можно использовать для разведки, идентификации целей и оценки угроз [10, 11]. Таким образом, в конкретные возможности и задачи многоцелевого робота-разведчика с ИИ могут входить и другие задачи. Исходя из вышесказанных перечисленных задач робот-разведчика, следует уделять внимание его конструктивной и аппаратной части, работающих при нагрузках. Поэтому в данной статье основной целью является исследование конструкции шасси колесного типа в зависимости от прилагаемых внешних нагрузок. Аппаратная часть, оперирующая, главным образом, на роботе микроконтроллера с подключением различных датчиков, будет исследована на отдельных роботах.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ходовая часть узлов поворота (2), закрепленных на кронштейнах (1). Конструкция робота-разведчика представляет собой колесный тип, общий вид которого представлен на рисунке 1. Он состоит из поддона (12), на котором устанавливаются литий-ионный аккумулятор (13), обеспечивающий питанием всю систему, драйверы двигателей, служащие для управления самих двигателей при помощи микроконтроллера, подставка рулевого шагового двигателя (6) и, собственно, сам шаговый двигатель (7). На втором этаже подставки (8) будет устанавливаться аппаратная часть с подключением всех необходимых датчиков, управляемых микроконтроллером. Диски колес, как и большей части конструкции, выполнены из ABS пластика, а шины колес выполнены из другого типа материала – TPU пластика. Управление угла поворота осуществляется ведущей прямозубой шестерней (5), соединенной с валом шагового двигателя модели 17HS4023 (7). За счет вращения ведущей шестерни осуществляется возвратно-поступательное движение рейки (4), в свою очередь она обеспечивает заданный угол поворота передних колес. Два дополнительных шаговых двигателя (11) устанавливаются на задних колесах (9), обеспечивающих движение робота по обе стороны. Они крепятся на задних подставках шаговых двигателей (10) и закрепляются металлическими крепежными элементами.

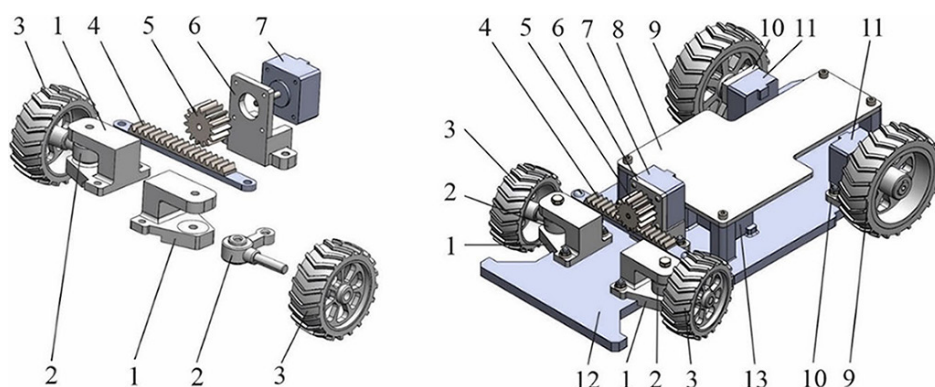
В качестве конструкционных материалов во всех элементах робота был выбран ABS пластик как наиболее дешевый и общедоступный материал. Он имеет относительно невысокую прочность, работает при небольших нагрузках. В этой связи, было принято

решение проверить прочность на наиболее уязвимых частях робота. Таковыми является область поворота шасси, а именно детали узла поворота, закреплённого в кронштейне. В расчет принимается нагрузка на одно колесо переднего шасси от 1 до 10 кг. Эта нагрузка будет распределенной нагрузкой на ось вала детали узла поворота (рисунок 2, а).

Распределительная сила q , проявляемая на вал узла поворота, возникает вследствие третьего закона Ньютона, за счет противодействия силы, нагружаемой от внешней нагрузки. За направление этих сил принимается снизу вверх (рисунок 2, а). Реакции опоры R_A и M_A составляются из уравнений вертикальных и изгибающих сил. Фактор проявляемых этих сил в точке заделки связан с распределительной нагрузкой. Исходя

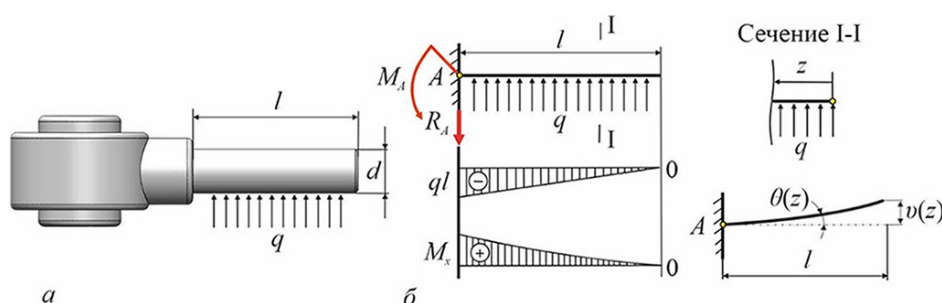
из эпюры следует, что по мере приближения к точке заделки поперечные силы ql возрастают. Наиболее максимальные значения достигаются при максимальной длине l . Изгибающий момент $M_x(z)$ также возрастает по мере приближения z к точке заделки. В этом положительное значение говорит о том, что сжимаются верхние волокна вала, а нижние растягиваются. При нагружении вала снизу вверх, торец вала (при изгибе вала) перемещается вверх на величину $v(z)$, соответственно в этом случае образуется и вторая величина – угол поворота вала $\theta(z)$. В обоих случаях наблюдается уменьшение этих величин по мере приближения к точке заделки (рисунок 2, б).

Таким образом, при определении прочностных характеристик узла поворота, а именно $\theta(z)$ и $v(z)$ применяется метод на-



1 – кронштейн передней части; 2 – узел поворота; 3 – передние колеса; 4 – рейка; 5 – шестерня; 6 – подставка рулевого шагового двигателя; 7 – шаговый двигатель; 8 – подставка; 9 – задние колеса; 10 – задняя подставка шаговых двигателей; 11 – шаговые двигатели; 12 – поддон; 13 – литий-ионный аккумулятор

Рисунок 1 – Общий вид конструкции ходовой части многоцелевого разведывательного робота



q – распределительная нагрузка; l и d – длина и диаметр вала; R_A и M_A – реакции опоры в заделке; ql – поперечные силы; M_A – изгибающий момент; z – длина сечений участка; $\theta(z)$ и $v(z)$ – угол поворота и прогиб вала

Рисунок 2 – Схема распределительной нагрузки на вал детали узла поворота (а), эпюра поперечных и изгибающих моментов (б)

чальных параметров [12, 13]. Данный метод заключается в составлении уравнения изгибающего момента для заданного участка вала, путем интегрирования этого уравнения с получением двух уравнений – угла поворота $\theta(z)$ и прогиба поперечного сечения $v(z)$. Применим данный метод исследования к детали узла поворота. Определим смещение поперечного сечения при нагружении на вал 1, 5 и 10 кг. Это соответствует примерно $q = 0,25$ кН/м, $1,25$ кН/м и $2,5$ кН/м (при расчете $1 \text{ кг} \sim 100 \text{ Н}$). Диаметр исследуемого вала $d = 6$ мм и длина $l = 40$ мм.

При заданных значениях распределительных нагрузок q позволяет определить значения поперечных и изгибающих моментов сил, если рассмотреть вал длиной l в качестве консольной балки. Исходя из суммы всех вертикальных действующих на вал сил $F_y = 0$, получаем выражение для опорной реакции $R_A = -ql$ в точке А. Тогда для той же точки А сумма моментов сил равняется $M_A = 0,5ql^2$. Для построения эпюры сил следует мысленно рассечь сечение I-I и составить в интервале $0 \leq z \leq l$ два уравнения: одно – для поперечных сил Q_{yI} , которое равняется $-qz$ (по правилу знак минус берется тогда, когда рассматривается сечение справа налево), второе – для изгибающих моментов M_{xI} , равняющийся $0,5qz^2$.

Для того чтобы определить перемещения вала, необходимо составить уравнения изгибающего момента в заданном интервале. Для участка $0 \leq z \leq l$ сумма изгибающего момента равна $M_x(z) = 0,5qz^2$. С учетом постоянных величин модуль Юнга и момент инерции сечения вала I_x определяются уравнением угла поворота, путем интегрирования по dz :

$$\theta(z) = \int \frac{1}{EI_x} M_x(z) dz = \frac{1}{EI_x} \frac{qz^3}{6} + \theta_0. \quad (1)$$

Проинтегрировав второй раз выражение (1), получим уравнение прогиба:

$$\begin{aligned} v(z) &= \int \left(\frac{1}{EI_x} \frac{qz^3}{6} + \theta_0 \right) dz = \\ &= \frac{1}{EI_x} \frac{qz^4}{24} + \theta_0 z + v_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где θ_0, v_0 – начальные параметры угла поворота и прогиба вала.

E – модуль Юнга (для ABS пластика: $E = 200 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$);

I_x – момент инерции сечения вала (для заданного диаметра вала 6 мм момент инерции равен $I_x = \pi d^4 / 32 = 6,3585 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$).

В связи с очень маленькими значениями начальных параметров (порядка $\sim 10^{-7}$) в опорной точке А принимаются значения

$\theta = 0$ и $v_0 = 0$. Это позволяет определить углы поворота и прогиба на заданном расстоянии длины вала $l = 40$ мм (или $0,04$ м). Подставив все известные величины в уравнения (1) и (2), получим расчетные зависимости двух уравнений: $\theta(z) = 8,3877 \cdot 10^{-5} q$ (рад) и $v(z) = 8,3877 \cdot 10^{-7} q$.

Научные результаты

Основными результатами, полученными в ходе теоретического и компьютерного моделирования, являются величины поперечных сил, изгибающих моментов, прогиба вала и угла поворота в зависимости от распределительной нагрузки 1, 5 и 10 кг на длину вала (рисунок 3). Определен подбор допустимой распределительной нагрузки и получены зависимости четырех вышеуказанных величин от длины вала (рисунок 4). Для подтверждения теоретических расчетов получены новые результаты компьютерного моделирования, которые были сравнены с величинами прогиба вала $v(z)$ (см. рисунок 5).

Результаты расчетов на изгиб вала узла поворота под воздействием приложенных к нему распределительных сил сведены в таблице. В ходе полученных результатов видим, что с ростом распределительных нагрузок увеличивается не только поперечная сила, но и изгибающий момент. Выяснилось, что при нагружении на вал распределительной нагрузкой $q = 2,50$ кН/м (~ 10 кг), прочность при изгибе составила $\sigma = M_x(0,04) / W_x = 2 / 0,1d^3 = 92,6$ МПа. Для ABS пластика это является недопустимой нагрузкой, так как предел прочности при изгибе для данного вида материала составляет $[\sigma] = 64,4$ МПа. Угол наклона в этом случае составил порядка 12° , что приводит к искажению конструкции, а поперечное смещение (прогиб) составило ~ 2 мм (рисунок 3).

При уменьшении распределительной нагрузки до $1,25$ кН/м (~ 5 кг) прочность при изгибе уменьшилась в два раза и составила $46,3$ МПа. В целом это обеспечивает необходимую прочность $\sigma \leq [\sigma]$ ($46,3 \leq 64,4$) конструкции. Угол наклона и прогиб вала в этом случае также уменьшились в два раза.

Был проведен анализ зависимости поперечных сил, изгибающих моментов, угла наклона и прогиба от расстояния заделки вала (рисунок 4). Анализ показал, что по мере отдаления от опорной точки вала, во всех случаях при разных нагружениях наблюдается увеличение смещений поперечных сечений по параболическим законам.

Из трех случаев нагружений (линии 1, 2 и 3) выявлены минимальные показания у первых линий, с распределительной нагрузкой $0,25$ кН/м (~ 1 кг). Для заданной длины вала $0,04$ м наиболее оптимальным являет-

Результаты анализа вала при воздействиях внешних нагрузок					
№	q , кН/м	Q_y , кН	$M_x(z)$, Н·м	$\theta(z)$, град	$v(z)$, мм
1	0,25	– 0,01	0,2	1,20	0,2097
2	1,25	– 0,05	1,0	6,01	1,0485
3	2,50	– 0,10	2,0	12,02	2,0969

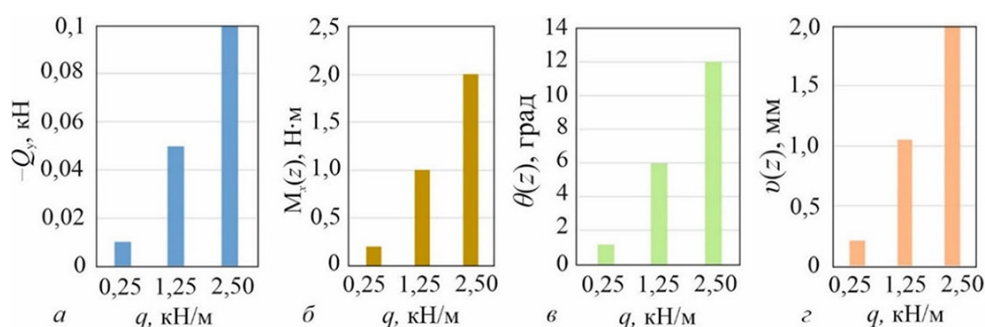


Рисунок 3 – Графики зависимостей поперечных сил (а), изгибающих моментов (б), угла поворота (в) и прогиба (г) от распределительной нагрузки q при максимальной длине вала $z = 0,04$ м

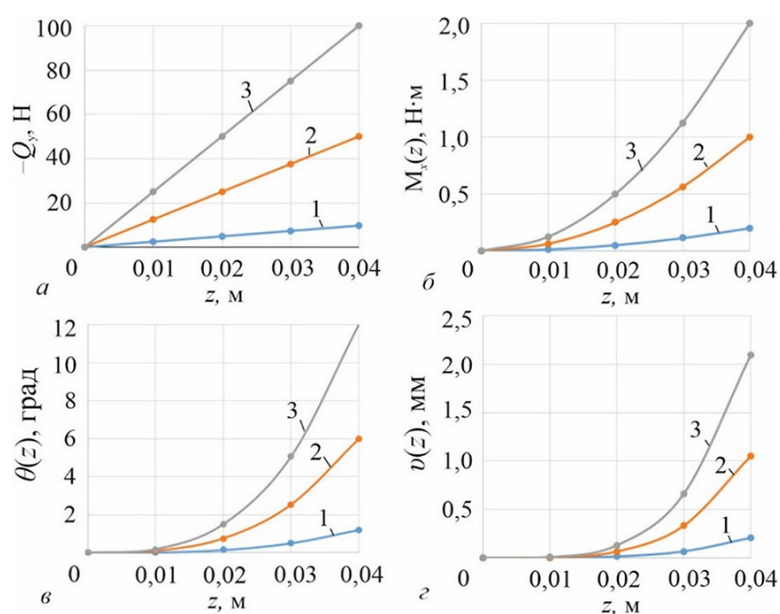


Рисунок 4 – Участки поперечных сил (а), изгибающих моментов (б), угла поворота (в) и прогиба (г) в зависимости от длины вала z и распределительных нагрузок q : линии (1) $q = 0,25$ кН/м; (2) $q = 1,25$ кН/м; (3) $q = 2,5$ кН/м

ся распределительная нагрузка 1,25 кН/м (~ 5 кг). Конструкция детали в этом случае обеспечивает надежность, если судить по отношению предела прочности, максимальный прогиб составляет ~ 1 мм. При максимальном нагружении распределительной нагрузки, как было отмечено выше, прогиб составил порядка 2 мм, что является не-

приемлемым результатом. Решение может быть только одно: либо уменьшить длину вала, что приведет к уменьшению обхвата внутреннего отверстия колеса с валом, тем самым уменьшая надежность конструкции, либо уменьшить ширину колеса, что является также нежелательным, так как приведет к заглоблению колес из-за меньших повер-

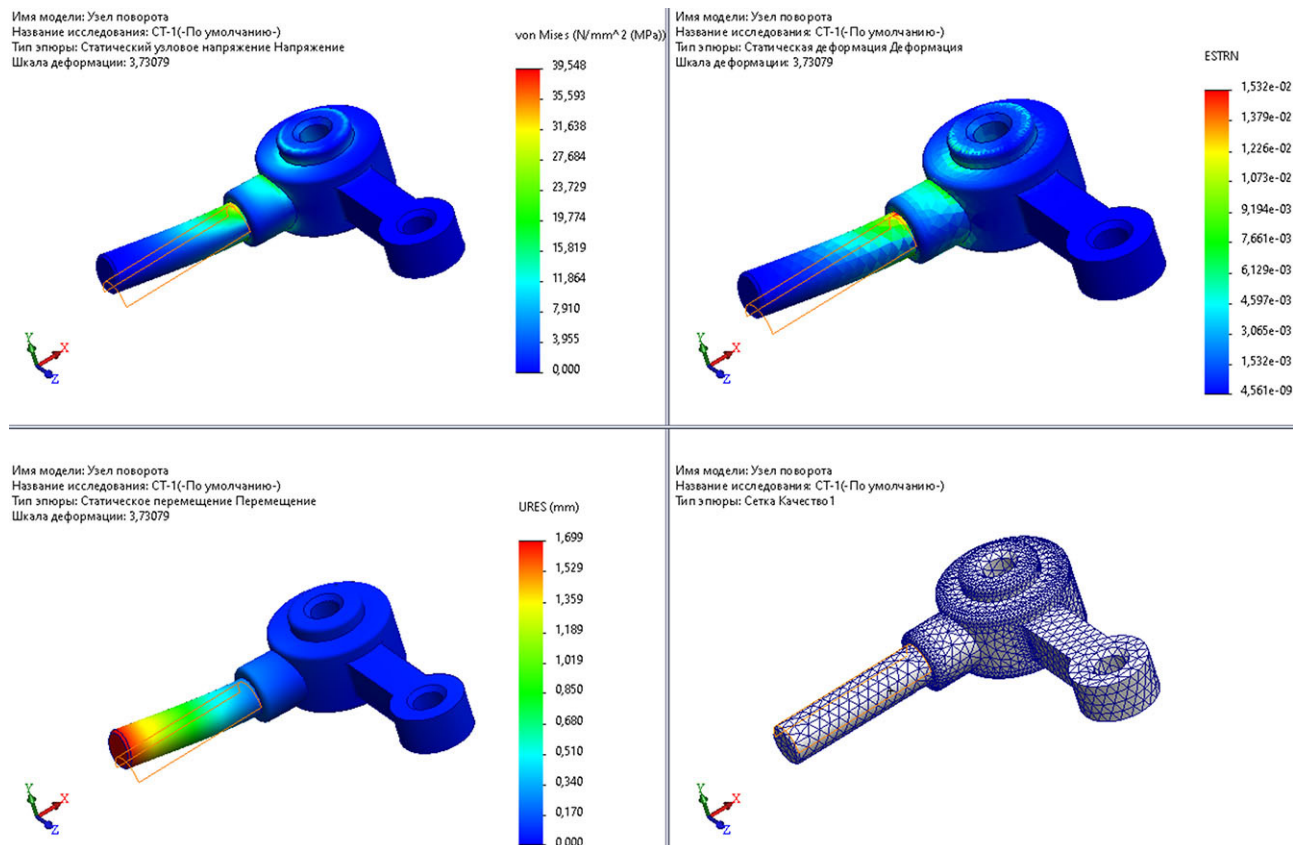


Рисунок 5 – Статический анализ моделирования детали на изгиб

ностных контактов, особенно в глинистых, песчаных средах.

При анализе компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения SolidWorks были проведены испытания детали на изгиб путем приложения максимальной распределительной нагрузки до $q = 2,50$ кН/м (~ 10 кг) (рисунок 5). В ходе нагружения максимальное поперечное перемещение вала составило $\sim 1,69$ мм, отклонение от теоретических расчетов составило 19% (перемещение при расчете составляло $\sim 2,1$ мм). По показаниям эпюры моделирования, максимальные напряжения и деформируемые области детали приходятся на верхнюю часть вала, ближе к оси фиксации. В данной области происходит сжатие верхних и растяжение нижних волокон вала, что в конечном счете может привести к износу детали. Количественная оценка на усталость в данной работе не проводилась. Таким образом, из всех нагружаемых величин, на наш взгляд, наиболее оптимальным является распределительная нагрузка $1,25$ кН/м (~ 5 кг).

В полученных научных результатах также следует учесть и недостатки. В них не были учтены эксплуатационные исследования. В эксплуатационных случаях с учетом собственного веса машины дополнитель-

но подвергается колебательным процессам, вызывающим движением робота не по плоскостным поверхностям. Не учтены воздействия температуры на конструкцию, вызывающие пластическую деформацию, например, в экстремальных погодных условиях (в случае аномальной жары) или эксплуатация робота в горячих точках (например, в пожарах разного рода). Также в конструкции не была учтена защита от воздействия влаги, которая может вывести из строя аппаратную часть. Все это требует дополнительного исследования, которое выходит за рамки данной научной статьи.

Заключение

Исходя из полученных теоретических и практических результатов компьютерного моделирования, следует сделать вывод о надежности конструкции шасси передних колес при нагружении распределительной нагрузки на вал узла поворота до 5 кг. При нагрузке 5 кг угол поворота вала составил 6° , прогиб вала 1 мм. Эти показания не превышают предел прочности на изгиб. На наш взгляд, это является приемлемым результатом в эксплуатации данного вида робота. Если сделать заключение в целом, с учетом нагрузки до 5 кг на колесо, робот-разведчик выдержит нагрузку до 20 кг при приложении внешней нагрузки в центр машины.

Таким образом, при 20 кг позволяет транспортировать не только аппаратную часть, но и какую-либо дополнительную полезную нагрузку.

Работа выполняется при поддержке грантового финансирования Комитета науки Министерства и высшего образования Республики Казахстан (проект № AP19677508).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.В. Мобильные мини-роботы разведки: текущее состояние, характерные черты и общие тенденции развития // Известия ЮФУ. – 2010. № 3 (104). С. 119-124.
2. Военные роботы и их разработчики. Часть 2. [Электронный ресурс]. <https://habr.com/ru> (дата обращения: 05.11.2023).
3. Everett H.R. Sensors for Mobile Robots. – Publisher: A K Peters / CRC Press, 1995. – P. 542.
4. Nathan Ida. Sensors, Actuators, and Their Interfaces: A multidisciplinary introduction (Control, Robotics and Sensors). – Publisher: The Institution of Engineering and Technology; 2nd edition (March 26, 2020). – P. 928.
5. Фрейдин Я. Современные датчики: Справочник. – М.: Изд-во «Техносфера», 2021. – 800 с.
6. Платт Ч., Янссон Ф. Энциклопедия электронных компонентов. Датчики местоположения, присутствия, ориентации. – СПб: Издательство БХВ-Петербург, 2020. – 288 с.
7. Клетте Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2019. – 506 с.
8. Тёрк М., Дэвис Р. Компьютерное зрение. Передовые методы и глубокое обучение. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2022. – 690 с.
9. Petros I. Adaptive Control Tutorial (Advances in Design and Control). – Publisher: Society for Industrial and Applied Mathematics (September 20, 2007). – P. 184.
10. Brett S. Martin. Military Robots. – Publisher: Core Library, 2018. – P. 480.
11. Paul J. Outsourcing War to Machines: The Military Robotics Revolution. – Publisher: Bloomsbury Academic, 2023. – P. 280.
12. Степин П.А. Соппротивление материалов: учебник. – М.: Изд-во Лань, 2022. – 320 с.
13. Иосилевич Г.Б. Прикладная механика. – М.: Изд-во Машиностроение, 2022. – 576 с.

Жасанды интеллектімен көп мақсатты барлаушы роботының шасси конструкциясының беріктігін бағалау

¹***АХМЕТОВ Кайрат Телектесович**, PhD, доцент, kairat.telektesovich@gmail.com,

¹**АТАНОВ Сабыржан Кобейсинович**, т.ғ.д., профессор, atanov5@mail.ru,

¹**МОЛДАМУРАТ Хуралай**, т.ғ.к., доцент, moldamurat@yandex.kz,

¹**БАЙМАНОВА Ажар Булатқызы**, магистрант, baimanova.a@mail.ru,

¹**СЕЙТБАТТАЛОВ Жексен Ермекұлы**, аға оқытушы, jeks_sbt@mail.ru,

¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Сәтпаев көшесі, 2, Астана, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Көп мақсатты барлаушы роботының шасси конструкциясының беріктігі мәселелері қарастырылған. Зерттеу нысаны – ABS-пластик материалдан жасалынған бұрылыс түйінінің бөлшегі. Алғаш рет, бұл бөлшекке сыртқы үлестірілген жүктемелерді 0,125-тен 2,5 кН/м дейін беріліп, көлденең күштер мен иілу моменттер параметрлері анықталды. Біліктің айналу бұрышын және көлденең ығысуын анықтау үшін бастапқы параметрлердің әдісі қолданылып, олардың мәндері 6° және 1 мм анықталған. Бұл көрсеткіш осы барлаушы робот түрі үшін қолайлы нәтиже болып табылады. Алынған теориялық нәтижелердің дұрыстығы үшін қосымша компьютерлік модельдеу әдісі қолданылды. Талдау барысында теориялық көрсеткіштерден шамалы ауытқулар анықталғанмен, жалпы бұл жүргізілген есептердің дұрыстығы туралы қорытынды жасауға мүмкіндік берді.

Кілт сөздер: барлаушы робот, бастапқы параметрлер әдісі, беріктік, көлденең күштер, иілу моменті.

Evaluation of the Chassis Strength of a Multi-purpose Reconnaissance Robot with Artificial Intelligence

¹***AKHMETOV Kairat**, PhD, Associate Professor, kairat.telektesovich@gmail.com,
¹**ATANOV Sabyrzhan**, Dr. of Tech. Sci., Professor, atanov5@mail.ru,
¹**MOLDAMURAT Khuralay**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, moldamurat@yandex.kz,
¹**BAIMANOVA Azhar**, Master's Student, baimanova.a@mail.ru,
¹**SEITBATTALOV Zheksen**, Senior Lecturer, jeks_sbt@mail.ru,
¹NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Satpayev Street, 2, Astana, Kazakhstan,
 *corresponding author.

Abstract. The issues the strength of the chassis design of a multi-purpose reconnaissance robot are considered. The object of study is the part of the turning unit, which is ABS plastic. For this part, the parameters of shear forces and bending moments were determined for the first time depending on the specified external distributed loads of 0.125 to 2.5 kN/m. The optimal limiting values of bending strength and shear forces arising when loading distribution loads are determined. To determine the shaft rotation angle and lateral displacement (deflection), the initial parameters method was used, the values of which were 6° and 1 mm, which is an acceptable result for this type of wheeled reconnaissance robot. To ensure the reliability of the obtained theoretical results, computer simulation for displacement was additionally applied. The analysis revealed minor deviations from theoretical indicators, which allowed us to conclude that the calculations were correct.

Keywords: reconnaissance robot, initial parameters method, strength, shear forces, bending moment.

REFERENCES

1. Vasil'yev A.V. Mobil'nyye mini-roboty razvedki: tekushcheye sostoyaniye, kharakternyye cherty i obshchiye tendentsii razvitiya [Mobile mini-robots for reconnaissance: current status, characteristic features and general development trends]. Publ. YUFU, 2010. No. 3 (104). Pp. 119-124.
2. Voyennyye roboty i ikh razrabotchiki. Chast' 2. (Elektronnyy resurs) [Military robots and their developers. Part 2. (date of the application: 05.11.2023)]. <https://habr.com/ru>.
3. Everett H.R. Sensors for Mobile Robots. Publisher: A K Peters / CRC Press, 1995. P. 542.
4. Nathan Ida. Sensors, Actuators, and Their Interfaces: A multidisciplinary introduction (Control, Robotics and Sensors). Publisher: The Institution of Engineering and Technology; 2nd edition (March 26, 2020). P. 928.
5. Ya. Freydin. Sovremennyye datchiki: Spravochnik [Modern sensors. Directory]. Moscow: Publ. «Tekhnosfera», 2021. P. 800.
6. Ch. Platt, F. Yansson. Entsiklopediya elektronnykh komponentov. Datchiki mestopolozheniya, prisutstviya, oriyentatsii [Computer vision. Advanced Techniques and Deep Learning]. Saint Petersburg: Publ. BKHV-Peterburg, 2020. P. 288.
7. R. Klette. Komp'yuternoye zreniye. Teoriya i algoritmy [Computer vision. Theory and algorithms]. Moscow: Publ. DMK Press, 2019. P. 506.
8. M. Tork, R. Devis. Komp'yuternoye zreniye. Peredovyye metody i glubo-koye obucheniye [Computer vision. Advanced Techniques and Deep Learning]. Moscow: Publ. DMK Press, 2022. P. 690.
9. Petros I. Adaptive Control Tutorial (Advances in Design and Control). Publisher: Society for Industrial and Applied Mathematics (September 20, 2007). P. 184.
10. Brett S. Martin. Military Robots. Publisher: Core Library, 2018. P. 480.
11. Paul J. Outsourcing War to Machines: The Military Robotics Revolution. Publisher: Bloomsbury Academic, 2023. P. 280.
12. Stepin, P.A. Soprotivleniye materialov: uchebnik [Strength of materials]. Moscow: Publ. Lan, 2022. P. 320.
13. Iosilevich, G.B. Prikladnaya mekhanika [applied mechanics]. Moscow: Publ. Mashinostroyeniye, 2022. P. 576.