

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:
//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.
Электрон. журн. 2025. № 1. С. 31 – 42.

DOI:

Представлена в редакцию: 17.01.2025

Принята к публикации: 13.02.2025

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 621.865.8

Определение динамических нагрузок механизма стабилизации грузовой платформы шагающего робота

Гончаренко Д.А.,*
Шамахов Л.М.

*goncharenko.danila03@bk.ru
Ярославский Государственный Технический
Университет (Ярославль, Россия)

В данной работе решается задача определения рациональной схемы расположения механизма стабилизации грузовой платформы шагающего робота. Целью исследования является анализ воздействия нагрузок, возникающих при фиксации грузовой платформы в заданном положении, в зависимости от конфигурации стабилизирующего механизма. Для решения задачи проведен динамический анализ механизма стабилизации с использованием системы автоматического проектирования SolidWorks Motion. В ходе работы были рассмотрены различные варианты расположения стабилизирующего механизма, что позволило выявить наиболее эффективные варианты его размещения. Полученные результаты позволяют повысить надежность механизма стабилизации и устойчивость грузовой платформы шагающего робота. В дальнейшем планируется провести экспериментальные исследования для верификации полученных данных и оптимизации конструкции стабилизирующего механизма грузовой платформы. Это позволит расширить функциональные возможности шагающего робота, что является важным шагом в развитии мобильных систем.

Ключевые слова: механизм стабилизации, шагающий робот, грузовая платформа, динамический анализ, схема размещения.

Введение

При проектировании шагающего робота с грузовой платформой возникли вопросы, связанные с установкой механизма стабилизации. Таким образом, требуется решить задачу расположения механизма стабилизации грузовой платформы для достижения максимальной грузоподъемности при наименьшем крутящем моменте возникающем на валах сервоприводов стабилизирующего механизма. Для решения поставленной задачи, был спроектирован лабораторный стенд для испытания схемы расположения механизма стабилизации. На первом этапе, описанном в данной работе, было принято решение о проведении динамического анализа в системе автоматизированного проектирования SolidWorks Motion.

Динамический анализ конструкции — это процесс, который позволяет определить и спрогнозировать ожидаемые амплитуды перемещений конструкции, внутренние усилия и напряжения, сравнить вынужденные колебания с допустимыми значениями, а также провести анализ свободных колебаний. Такой анализ, позволяет оценить поведение конструкции под действием различных условий.

Например, автором работы [1] рассматривается динамический анализ различных геометрических форм исполнения звеньев робота. Автор предлагает четыре различных формы звена робота-манипулятора для исследования влияния формы звена робота на его динамические характеристики. В качестве элемента робототехнической системы используется консольная балка, выступающая объектом анализа. Для дискретизации уравнений движения и моделирования различных форм робота манипулятора используется метод конечных элементов. Представлены результаты, иллюстрирующие параметры звена робота-манипулятора для каждой из четырёх форм. В работе исследованы такие параметры как момент инерции, собственная частота и внутреннее вязкое трение материала. Исследование включает расчёт динамической реакции на начальный крутящий момент, задаваемый приводом, а также анализ вибрации схвата. Результаты моделирования показывают, что вибрация конца схвата как на протяжении траектории, так и в конечной точке движения меньше у элемента, выполненного в форме сужающейся балки. В работе Кашлакова И.В. [2] рассматриваются вопросы моделирования сил взаимодействия при управлении движением шагающего робота. В результате исследования автору удалось определить силы взаимодействия, возникающие в процессе управления движением шагающего робота. Кроме того, была разработана математическая модель, позволяющая вычислять реакции опоры при контакте стопы робота с поверхностью. На основе предложенной модели возможно провести анализ энергетических затрат, связанных с движением шагающего робота, с последующей апробацией разрабатываемых алгоритмов управления.

Авторы Гончаренко В.И. и Данилов В.А. [3] рассмотрели основные типы конструкций шестиногих роботов и обосновали выбор конструкции реализованного макета робота. В результате работы авторы разработали математическую модель шестиногого шагающего робота, а также реализовали базовый алгоритм его передвижения. На основе вычислительного эксперимента было установлено, что геометрический подход является более предпочтительным для решения задач кинематического анализа шагающего аппарата с инсектоморфным типом конечностей. Работоспособность и эффективность разработанного алгоритмического обеспечения подтверждены экспериментально в ходе управления лабораторным макетом шагающего робота.

Работа [4] посвящена изучению динамики движения опорной конечности шагающего робота бионического типа. По результатам исследования установлено, что звенья механизма конечностей шагающего робота могут быть описаны различными моделями, например: абсолютно жесткими телами, упруго деформируемыми телами или пластично деформируемыми телами. В процессе движения звенья могут испытывать незначительные деформации, что необходимо учитывать при моделировании. В любой механической системе на движение звеньев накладываются связи, которые по сути являются кинематическими парами. Изучение динамики шагающего робота должно начинаться с разработки динамической модели его исполнительных систем. Для этого следует абстрагироваться от некоторых частных особенностей разрабатываемой системы, которые могут считаться несущественными, и сосредоточить внимание на тех конструктивных элементах, свойства которых наиболее важны для решения поставленной задачи. В данном случае была решена обратная задача динамики, которая заключалась в определении значений крутящих

моментов и требуемых мощностей, реализуемых приводами исполнительных звеньев, на основе параметрических уравнений, описывающих траекторию движения стопы конечности шагающего робота.

В следующей работе [5] исследовались способы стабилизации двуногих роботов в положении стоя на подвижной опоре. В результате получены два способа стабилизации двуногих шагающих роботов в положении стоя на нестационарной поверхности. В первом алгоритме управления используется как кинематическая, так и динамическая модель робота. Данный подход основан на методе инверсной динамики, при котором исходная нелинейная динамическая модель линеаризуется обратной связью. Второй способ стабилизации базируется на использовании кинематической модели робота. Для данного подхода разработан гибридный регулятор. При малых угловых скоростях подвижной поверхности управление происходит ПД-регулятором. На высоких угловых скоростях при управлении дополнительно используются показания гироскопа, установленного в торсе робота. В ходе сравнительного анализа были выявлены условия, при которых каждый из предложенных способов стабилизации при реализации на практике будет эффективнее. Полученные результаты могут быть использованы для стабилизации подобных роботов, осуществляющих перешагивания во время балансирования на подвижной поверхности или шагающих по ней. Направления дальнейших исследований заключаются в экспериментальной апробации разработанных алгоритмов стабилизации, а также в повышении числа звеньев и степеней свободы робота.

Теоретические основы проектирования роботизированных шагающих шасси описаны в работе [6]. Приведены нагрузочные характеристики, демонстрирующие параметры приводов и их зависимость от величины управляющих сигналов. Для шагающих машин требуются сервоприводы с удельным крутящим моментом (отношение крутящего момента к массе сервопривода) не менее 29,4 Н·м/кг при скорости вращения выходного вала 300 %с. Практический эксперимент показал, что шагающая машина способна развивать тяговое усилие до 98 Н при быстром движении и 324 Н при медленном, равномерно распределяя нагрузку на все приводы. Моделирование движения опытной шагающей машины массой 5 кг продемонстрировало максимальную скорость по ровной поверхности 1,12 м/с (4 км/ч) при высоком энергопотреблении — 850 Вт·ч. Снижение скорости вдвое позволяет сократить энергозатраты до 320 Вт·ч. При создании тяги (например, для преодоления сопротивления движению) или транспортировке груза энергопотребление существенно возрастает. Кроме того, разработана методика проектирования шагающих машин с динамической устойчивостью, позволяющая использовать два подхода: определение параметров машины на основе характеристик приводов или подбор приводов по заданным характеристикам машины.

Работа Чернышева В. В. [7] объясняет структуру энергозатрат шагающих машин и роботов при реализации больших тяговых усилий. Автор говорит о том, что имеется принципиальная возможность разработки шагающего движителя на базе цикловых механизмов в котором различные затраты мощности обусловленные самим шагающим способом передвижения и затраты мощности на прессование грунта и на реализацию полезного тягового усилия будут лежать в противофазе, либо их максимумы будут смещены во времени. Тем самым можно решить задачу повышения энергоэффективности движения шагающих робототехнических систем. За счет управления законом движения опорной точки по траектории можно несколько уменьшить неравномерность требуемой мощности на движение лишь в случае сравнительно небольшого тягового усилия. Дополнительные затраты мощности, обусловленные шагающим способом передвижения, в этом случае мало влияют на общие энергозатраты на передвижение. Результаты работы могут быть

востребованы при разработке как простейших шагающих машин, например шагающих тракторов, так и для сложных шагающих робототехнических систем предназначенных для проведения грунтовых работ при дефиците сцепного веса, например, в подводных условиях либо в условиях ослабленной гравитации.

Исследование генерации задающих воздействий для шагающего робота с упругими элементами описано в работе [8]. Автор рассматривает вопросы генерации последовательности шагов и задания траектории центра масс для шагающих роботов с упругими элементами. Также исследуется точность позиционирования робота, включая локализацию его стоп и центра масс. Необходимо уточнение критерия сохранения роботом вертикальной устойчивости, поэтому требуется использование процедур коррекции передвижения робота с целью избежать накопления ошибки его позиционирования. Распределение значений ошибки позиционирования робота после выполнения заданного движения может рассматриваться как целевая функция при решении задачи оптимального выбора параметров передвижения робота. Предложены подходы к решению обратной задачи кинематики, основанные на использовании информации о динамике механизма для построения реализуемых траекторий в конфигурационном пространстве робота.

1. Материалы и методы

Проанализировав существующие работы, было решено спроектировать лабораторный стенд для проведения испытаний стабилизирующего механизма грузовой платформы шагающего робота (рис.1) [9,10].

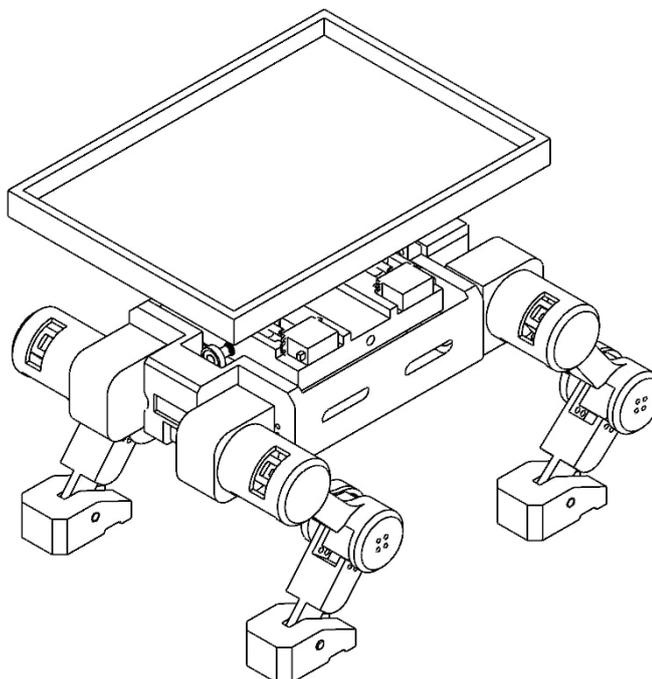


Рис.1. Шагающий робот с грузовой платформой

Стенд (рис.2) позволит решить вопрос, связанный со схемой расположения стабилизирующего механизма с целью достижения максимальной грузоподъемности при минимальном крутящем моменте на выходных валах сервоприводов механизма стабилизации грузовой платформы в двух осях из трех возможных.

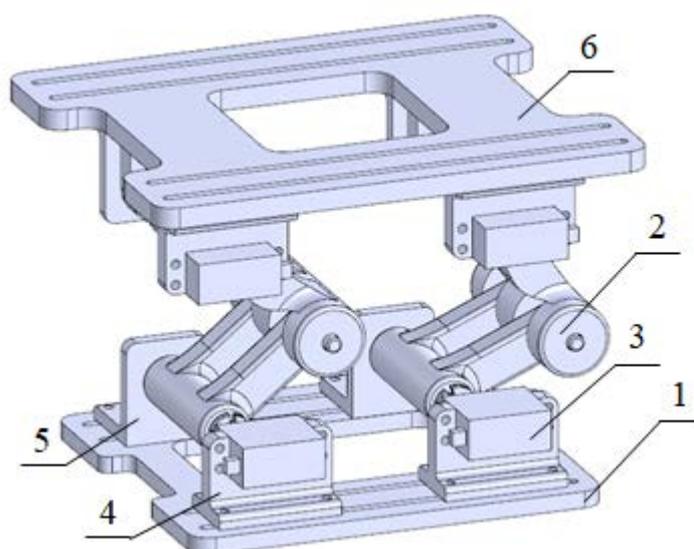


Рис.2. Испытательный стенд: 1 – Основание, 2 – Механизм подъема-опускания, 3 – Серводвигатель, 4 – Основание серводвигателя, 5 – Опора, 6 – Грузовая платформа

В процессе компьютерного моделирования, ко всем схемам расположения механизмов подъема-опускания приложена одинаковая и постоянная нагрузка в 50Н. Во время испытаний, механизмы подъема-опускания совершают возвратно-поступательные движения вверх и вниз с частотой 0,3 Гц. Первый опыт проводился, когда основание стенда находилось в статическом положении при трех разных расположениях механизмов подъема-опускания (рис.3).

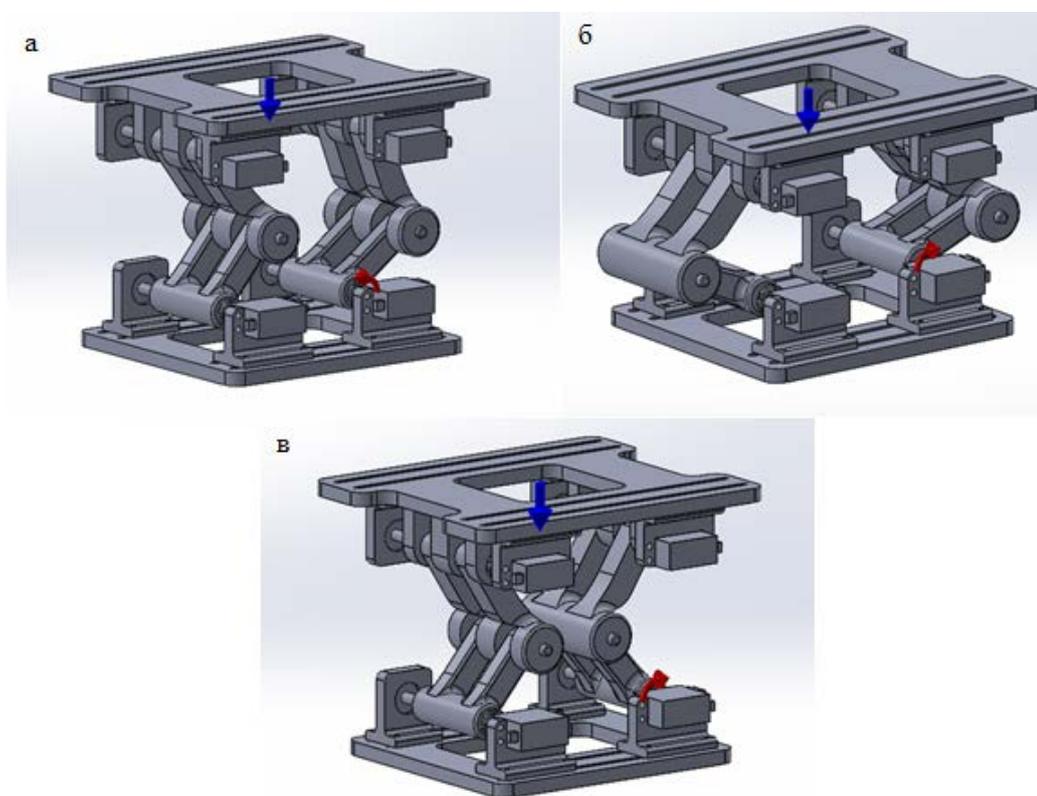


Рис. 3. Испытуемые положения механизмов подъема-опускания: а – расположены одинаково, б – «снаружи», в – «внутри»

Особый интерес, представляют крутящие моменты возникающие в процессе подъема или спуска шагающего робота при стабилизации грузовой платформы в горизонтальном положении. С этой целью, компьютерное моделирование проводилось с дополнительной осевой нагрузкой имитирующей вращение «корпуса», относительно грузовой платформы. Корпусом же выступало основание лабораторного стенда (рис.4).

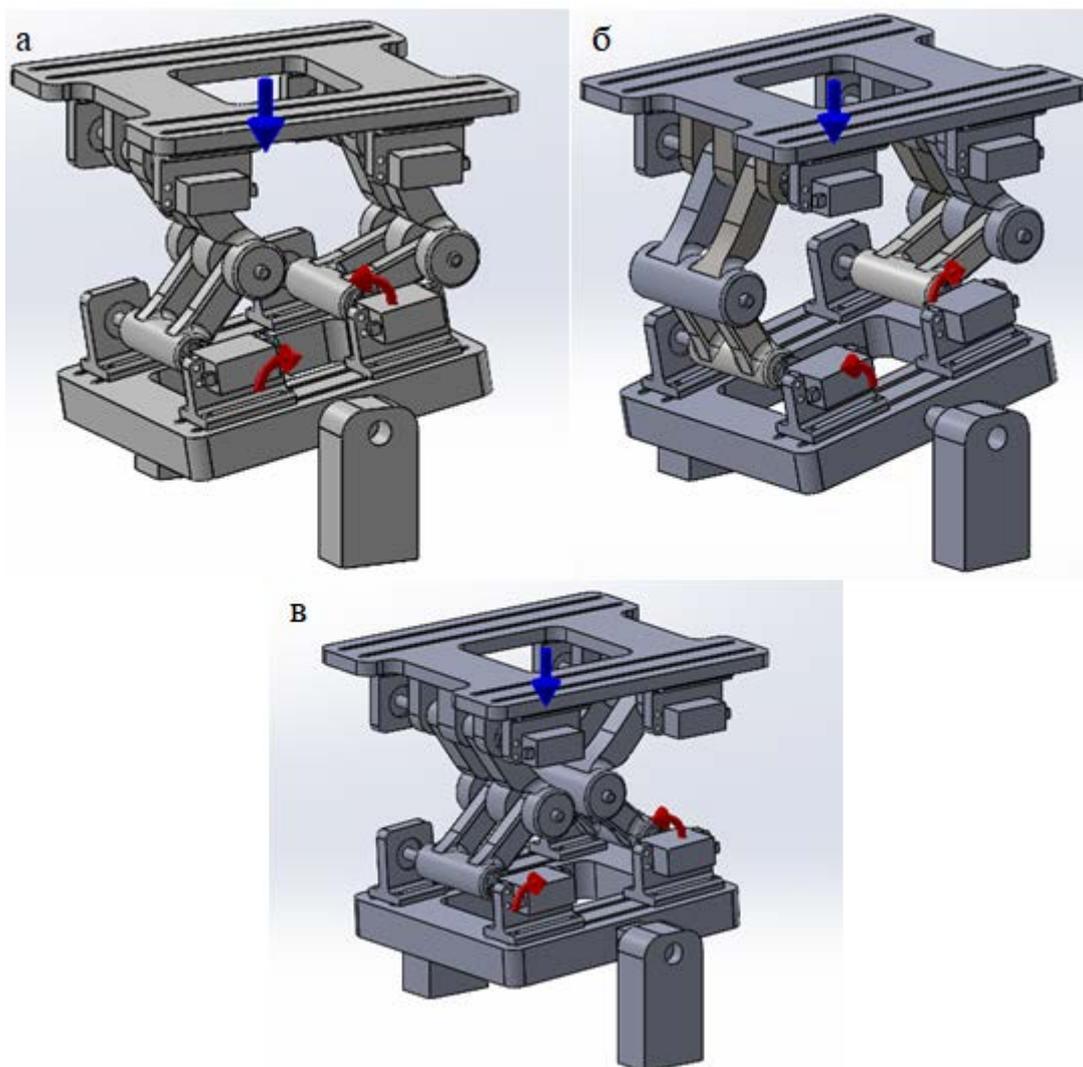


Рис. 4. Испытуемые положения механизмов подъема-опускания с дополнительной осевой нагрузкой: а – при одинаковом расположении, б – «снаружи», в – «внутри»

2. Результаты

В результате проведения испытаний получены графики зависимости вращающего момента от времени (рис. 5) для одного из сервоприводов испытательного стенда при различном расположении механизмов подъема-опускания. Так, при одинаковом расположении механизмов подъема-опускания максимальный момент составил 3329 Н×мм, что меньше по сравнению со схемой расположения «снаружи», где вращающий момент достигает 4562 Н×мм. Это объясняется тем, что возможный ход механизма подъема-опускания по схеме «снаружи» является наибольшим.

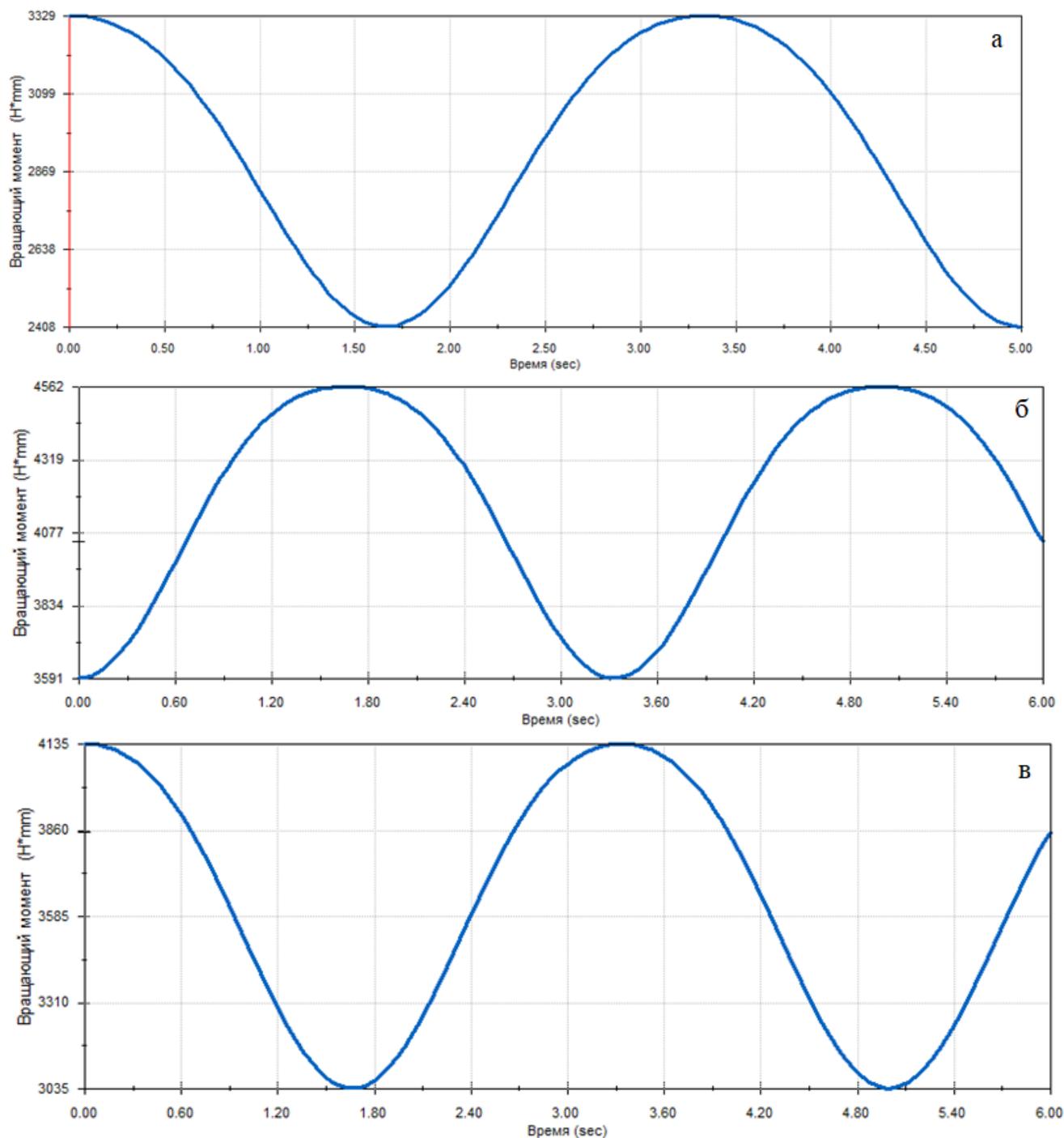


Рис. 5. Графики зависимости вращающих моментов от времени: а – при одинаковом расположении механизмов подъема-опускания, б – по схеме «снаружи», в – по схеме «внутри»

Полученные графики зависимости вращающих моментов от времени позволяют определить максимальные напряжения и деформации в реальный момент времени. Исходя из этого, становится возможным выявление элементов конструкции механизма подъема-опускания подвергающихся наибольшей нагрузке, что, в свою очередь, позволит внести изменения в конструкцию еще на этапе проектирования. Также, полученные данные позволят в дальнейшем провести топологическую оптимизацию испытуемого механизма с целью уменьшения массы с сохранением прочностных характеристик изделия.

На рис.6 где схемы механизмов подъема-опускания расположены одинаково максимальное значение крутящего момента составило 3643 Н×мм. При этом на эпюре можно заметить, что возникает дополнительный скачок до максимального крутящего момента. Это связано с тем, что для стабилизации грузовой платформы в горизонтальном положении увеличивается ход одного из механизмов подъема-опускания, и когда механизм проходит горизонтальное положение, крутящий момент уменьшается. При расположении механизмов подъема-опускания по схеме «снаружи» максимальный момент составит 3742 Н×мм. В таком случае нагрузки увеличиваются, но рабочий ход механизма подъема-опускания значительно возрастает.

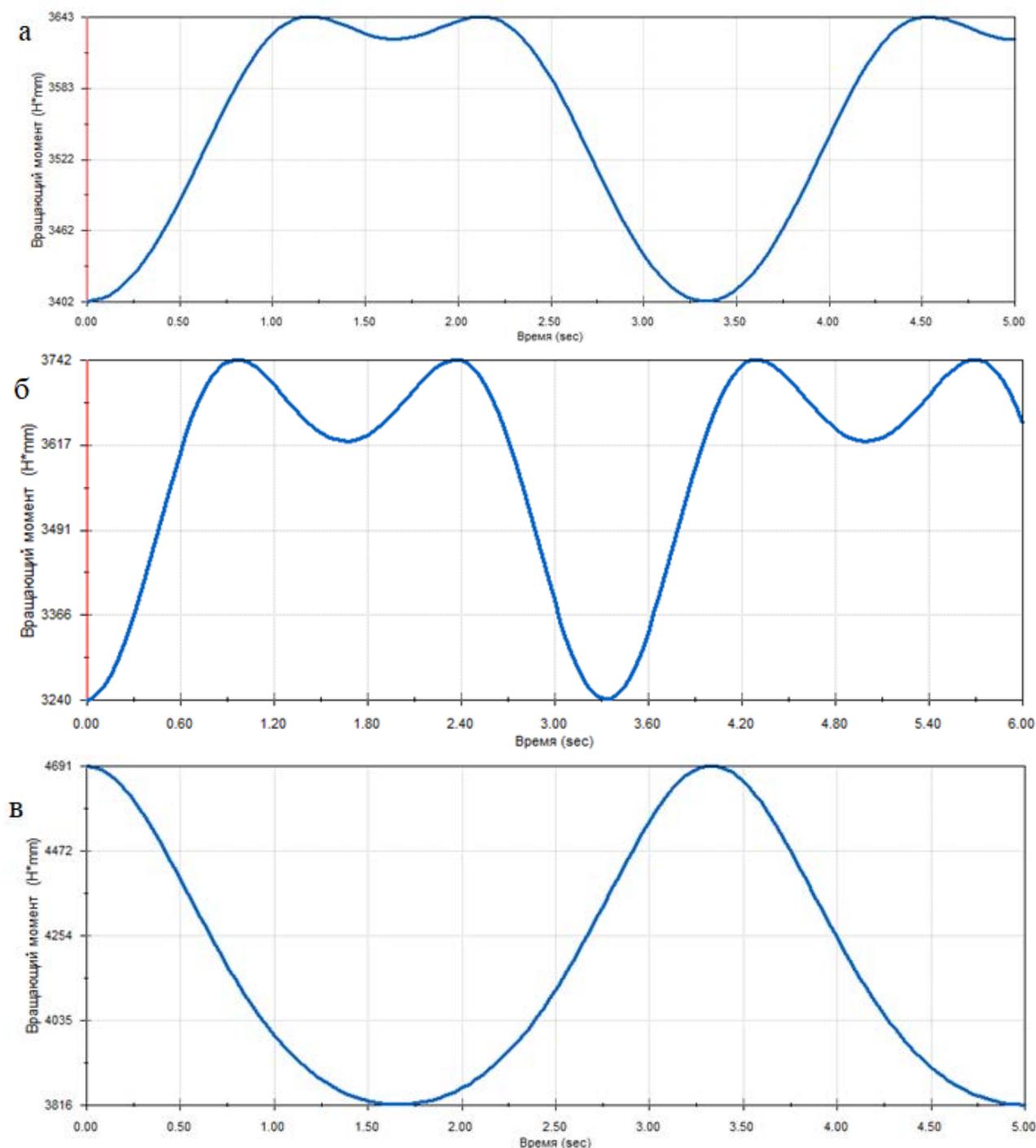


Рис. 6. Графики зависимости вращающих моментов от времени с дополнительной осевой нагрузкой: а – при одинаковом расположении механизмов подъема-опускания, б – по схеме «снаружи», в – по схеме «внутри»

Выводы

Таким образом, проанализировав полученные графики зависимости вращающих моментов от времени крутящих моментов, можно оценить возможности механизма стабилизации грузовой платформы при подъеме и опускании шагающего робота. Вместе с тем, результаты динамического моделирования механизма стабилизации позволяют обосновать такие характеристики как максимальный и минимальный угол наклона звеньев механизма подъема-опускания, скорость движения и максимально возможную массу, которую сможет удерживать в горизонтальном положении механизм стабилизации.

Также, полученные результаты нужны для разработки алгоритма управления, который позволит адаптироваться системе к изменяющимся условиям. Это может включать в себя изменение крутящего момента в зависимости от текущей нагрузки и положения робота.

Список литературы

1. Саад Загхлюл, С. А. К. Динамический анализ различных геометрических форм исполнения звеньев робота / С. А. К. Саад Загхлюл // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. – № 3(151). – С. 14-18. – EDN KWLCXB.

2. Кашлаков, И. В. Моделирование контактных сил в системе управления шагающим роботом / И. В. Кашлаков, Ю. А. Жуков // Журнал передовых исследований в области естествознания. – 2024. – № 20. – С. 4-8. – DOI 10.26160/2572-4347-2024-20-4-8. – EDN TRSZWM.

3. Гончаренко, В. И. Проектирование шестиногих шагающих роботов в среде САД-системы / В. И. Гончаренко, В. А. Данилов // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2017) : ТРУДЫ XVII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Москва, 12–14 декабря 2017 года / Под ред. А.В. Толока, Институт проблем упр. им. В.А. Трапезникова. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2017. – С. 176-179. – EDN YWDIHM.

4. Рукавицын, А. Н. Исследование динамики движения опорной конечности шагающего робота бионического типа / А. Н. Рукавицын, П. В. Чжо // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 1(13). – С. 14-23. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-1-14-23. – EDN VDJYWN.

5. Способы стабилизации двуногих роботов в положении стоя на подвижной опоре / Д. Н. Базылев, А. А. Пыркин, А. А. Маргун [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 418-425. – DOI 10.17586/2226-1494-2015-15-3-418-425. – EDN TWCSUX.

6. Алейников, Ю. Г. Теоретические основы проектирования роботизированных шагающих шасси / Ю. Г. Алейников, Г. Е. Митягин, Я. Г. Митягина. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2023. – 166 с. – ISBN 978-5-605-12900-4. – EDN JHANO.

7. Чернышев, В. В. Структура энергозатрат шагающих машин и роботов при реализации больших тяговых усилий / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1(203). – С. 6-18. – DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-6-18. – EDN ZZKYGL.

8. Савин, С. И. Генерация задающих воздействий для шагающего робота с упругими элементами / С. И. Савин, Л. Ю. Ворочаева // Cloud of Science. – 2019. – Т. 6, № 1. – С. 144-168. – EDN BWJNDQ.

9. Гончаренко, Д. А. Шагающий робот как доставщик малых грузов на стройплощадке / Д. А. Гончаренко, Л. М. Шамахов // Семьдесят шестая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием : Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 19–20 апреля 2022 года. Том 76. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2023. – С. 464-467. – EDN JIEQHN.

10. Гончаренко, Д. А. Кинематика движения конечности шагающего робота / Д. А. Гончаренко // XVII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской научной конференции, Вологда, 20–24 ноября 2023 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. – С. 703-706. – EDN QJLNQU.

АВТОРЫ

Гончаренко Данила Алексеевич, студент каф. «Строительные и дорожные машины», Ярославский Государственный Технический Университет, г. Ярославль, пр-кт Московский д. 88, 150023, Российская Федерация, goncharenko.danila03@bk.ru

Шамахов Леонид Михайлович, ассистент каф. «Строительные и дорожные машины», Ярославский Государственный Технический Университет, г. Ярославль, пр-кт Московский, д. 88, 150023, Российская Федерация, leonid.shamakhov@yandex.ru

Machines & Plants Design & Exploiting

Electronic journal
International Public Organization
“Integration strategy”
<http://maplants-journal.ru>

//Machines and Plants:Design and Exploiting.
2025. № 1. pp. 31 – 42.

DOI:

Received: 17.01.2025

Accepted for publication: 13.02.2025

© International Public Organization “Integration strategy”

Determination of dynamic loads of the load platform stabilization mechanism of a walking robot

Danila A. Goncharenko,*
Shamakhov Leonid M.

*goncharenko.danila03@bk.ru
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russian Federation

In this paper, the problem of determining the rational layout of the mechanism for stabilizing the cargo platform of a walking robot is solved. The study is aimed at determining the effect of various loads that occur when holding the cargo platform in a given position, depending on the location of the stabilizing mechanism. To solve the problem, a dynamic analysis of the stabilization mechanism was carried out using the SolidWorks Motion automatic design system. In the course of the work, various options for the location of the stabilizing mechanism were considered, which made it possible to identify the most effective options for its placement. The results obtained make it possible to increase the reliability of the stabilization mechanism and the stability of the cargo platform of the walking robot. In the future, it is planned to conduct experimental studies to verify the data obtained and optimize the design of the stabilizing mechanism of the cargo platform. This will expand the functionality of the walking robot, which is an important step in the development of mobile systems.

Keywords: Stabilization mechanism, walking robot, cargo platform, dynamic analysis, placement scheme.

References

1. Saad Zaghlyul, S. A. K. Dynamic analysis of various geometric shapes of robot links / S. A. K. Saad Zaghlyul // News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences. – 2009. – № 3(151). – Pp. 14-18. – EDN KWLCXB.
2. Kashlakov, I. V. Modeling of contact forces in the control system of a walking robot / I. V. Kashlakov, Yu. A. Zhukov // Journal of Advanced Research in the field of Natural Sciences. – 2024. – No. 20. – pp. 4-8. – DOI 10.26160/2572-4347-2024-20-4-8. – EDN TRSZWM.
3. Goncharenko, V. I. Design of six-legged walking robots in the CAD system environment / V. I. Goncharenko, V. A. Danilov // Systems of design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product (CAD/CAM/PDM – 2017): PROCEEDINGS OF the XVII INTERNATIONAL SCIENTIFIC and PRACTICAL CONFERENCE, Moscow, December 12-14, 2017 / Edited by A.V. Toloka, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems. Moscow: Trapeznikov Institute of Management Problems of

the Russian Academy of Sciences, 2017. pp. 176-179. EDN YWDIHM.

4. Rukavitsyn, A. N. Investigation of the dynamics of movement of the supporting limb of a walking bionic robot / A. N. Rukavitsyn, P. V. Zho // *Transport engineering*. – 2023. – № 1(13). – Pp. 14-23. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-1-14-23. – EDN VDJYWH.

5. Methods of stabilizing bipedal robots in a standing position on a movable support / D. N. Bazylev, A. A. Pyrkin, A. A. Margun [et al.] // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2015. – Vol. 15, No. 3. – pp. 418-425. – DOI 10.17586/2226-1494-2015-15-3-418-425. – EDN TWCSUX.

6. Aleynikov, Yu. G. Theoretical foundations of the design of robotic walking chassis / Yu. G. Aleynikov, G. E. Mityagin, Ya. G. Mityagina. – Moscow : Megapolis Limited Liability Company, 2023. – 166 p. – ISBN 978-5-605-12900-4. – EDN JHAHOP.

7. Chernyshev, V. V. The structure of energy consumption of walking machines and robots when implementing large traction forces / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev // *Izvestiya SFU. Technical sciences*. – 2019. – № 1(203). – Pp. 6-18. – DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-6-18. – EDN ZZKYGL.

8. Savin, S. I. Generation of control actions for a walking robot with elastic elements / S. I. Savin, L. Yu. Vorochaeva // *Cloud of Science*. – 2019. – Vol. 6, No. 1. – pp. 144-168. – EDN BWJNDQ.

9. Goncharenko, D. A. A walking robot as a deliverer of small loads on a construction site / D. A. Goncharenko, L. M. Shamakhov // *Seventy-sixth All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, undergraduates and postgraduates with international participation : A collection of conference materials*. In 3 parts, Yaroslavl, April 19-20, 2022. Volume 76. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2023. pp. 464-467. EDN JIEQHN.

10. Goncharenko, D. A. Kinematics of limb movement of a walking robot / D. A. Goncharenko // *XVII Annual scientific session of graduate students and young scientists : proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Vologda, November 20-24, 2023*. Vologda: Vologda State University, 2023. pp. 703-706. EDN QJLNQU.

AUTHORS

Danila A. Goncharenko, Student of the Department "Construction and Road Machines", Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Moskovsky Prospekt, 88, 150023, Russian Federation, goncharenko.danila03@bk.ru

Leonid M. Shamakhov, Assistant of the Department "Construction and Road machines", Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Moskovsky ave., 88, 150023, Russian Federation, leonid.shamakhov@yandex.ru