

# ТРАНСПОРТНЫЙ РОБОТ С РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

д.т.н. Рачков М.Ю.

Университет машиностроения (МАМИ)  
8 (917) 549-85-09, michyur@gmail.com

*В статье рассматриваются результаты исследования новой конструкции транспортного робота для автоматизации различных видов работ в чрезвычайных ситуациях. Целью исследования является расширение функциональных свойств робота за счет возможности преодоления им различных преград, а также скоростного перемещения по ровным поверхностям путем реконфигурации своей структуры под тип поверхности перемещения. Робот имеет два гусеничных движителя, расположенных по бокам платформы для технологического оборудования, и два колесных движителя, установленных спереди и сзади платформы между гусеничными группами. Особенностью конструкции является то, что оси колесных движителей связаны с платформой посредством рычагов, привод которых размещен на платформе с возможностью перемещения колесных движителей по вертикали относительно платформы. Длина рычагов может варьироваться, что позволяет трансформировать робота для преодоления различных препятствий. Разработана кинематическая модель робота в среде SolidWorks для исследования различных режимов движения. Создан экспериментальный образец робота с дистанционным управлением на основе стандартных комплектующих узлов. Его лабораторные испытания подтвердили возможность преодоления различных видов препятствий. Проведено моделирование системы управления выдвиганием рычагов в программе Matlab Simulink, которое показало устойчивость работы системы при заданных параметрах. Результаты могут быть использованы при создании полномасштабных роботов.*

**Ключевые слова:** транспортный робот, автоматизация, управление, чрезвычайная ситуация.

## Введение

В условиях чрезвычайных ситуаций, например, при пожарах и землетрясениях, а также при проведении опасных для человека операций, таких как разминирование, необходимо доставить соответствующее технологическое, инспекционное или спасательное оборудование в рабочую зону в автоматическом режиме. Удобным решением задачи является использование транспортных роботов, имеющих указанное оборудование на своем борту.

Схемы транспортных автономных платформ для работы в неструктурированной среде и для операций разминирования рассматривались в работах [1, 2]. Существуют транспортные роботы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций, имеющие гусеничные группы и платформу для установки бортового оборудования [3]. Эти роботы имеют возможность перемещения в неизвестных или внедорожных условиях, однако не могут преодолевать препятствия, в частности, сравнимые с высотой гусеничных групп, а также не в состоянии перемещаться по ступенькам лестничного марша. Из-за отсутствия колес они об-

ладают низкой скоростью движения по ровным поверхностям, что часто необходимо для самостоятельного быстрого попадания робота в зону проведения работ с места дислокации по магистралям.

В отличие от известных решений рассматриваемая конструкция робота позволяет перемещаться по различным видам поверхностей, включая условия урбанистического окружения, где необходимо преодолевать препятствия сложной конфигурации, например лестничные марши. Робот двигается на ровных поверхностях со скоростью, превышающей скорость перемещения транспортных средств, оборудованных движителями только гусеничного типа, а также позволяет сохранить ресурс гусеничных траков, подверженных износу при движении по твердым поверхностям, таким как асфальт или бетон, при этом не повреждаются и сами магистрали.

Робот обладает широкими возможностями для движения по пересеченной местности со сложным рельефом, а также для преодоления препятствий различной формы, в том числе с высотой большей, чем высота гусеничных групп.

### Конструкция транспортного робота

Предложенная конструкция робота содержит комбинированную систему движителей, состоящую из трансформируемых гусеничных и колесных групп (рис. 1).

Робот имеет два гусеничных движителя, расположенных по бокам платформы для оборудования, и два колесных движителя, установленных спереди и сзади платформы между гусеничными группами [4]. Особенностью является то, что оси колесных движителей связа-

ны с платформой посредством рычагов, привод которых размещен на платформе с возможностью перемещения колесных движителей по вертикали относительно платформы. Длина рычагов может варьироваться, что позволяет трансформировать робота для преодоления различных препятствий. Также на колесах предусмотрены выдвижные элементы, которые могут быть выполнены в виде шипов. Такое решение позволяет увеличивать диаметр колес и повышать их проходимость.

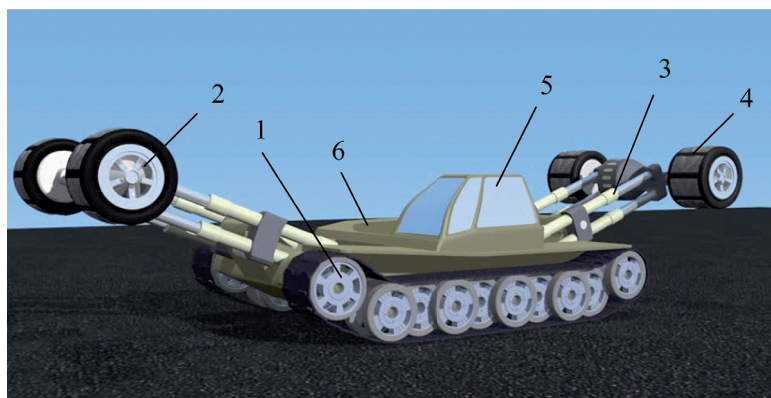
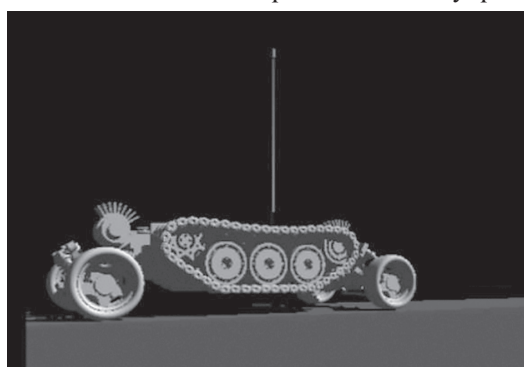
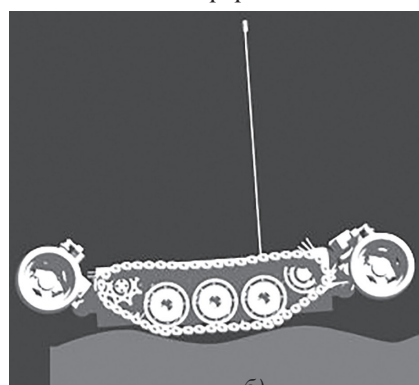


Рис. 1. Схема транспортного робота:

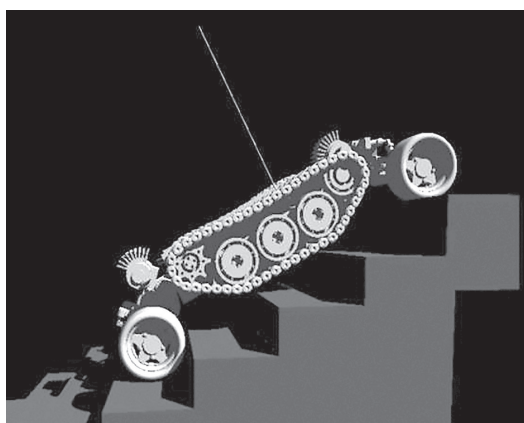
1 – гусеничная группа, 2 – колесная группа, 3 – телескопические рычаги, 4 – выдвижные элементы (шпиры), 5 – бортовая система управления, 6 – технологическая платформа



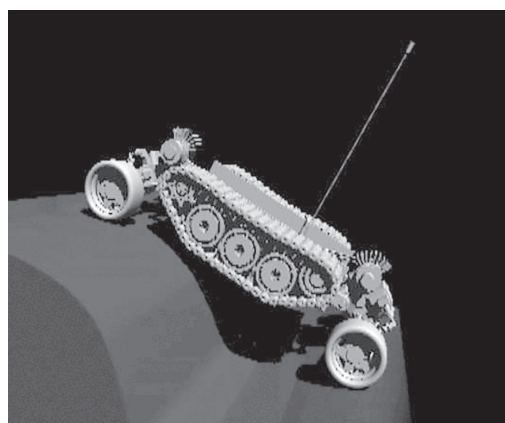
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Движение робота по различным типам поверхностей:

а – ровная поверхность, б – неровная поверхность, в – лестничный марш, г – препятствие сложной геометрической формы

Разработана кинематическая модель робота в среде SolidWorks для исследования различных режимов движения робота. Движение по ровной поверхности осуществляется только колесными группами с втянутыми выдвижными элементами при поднятых гусеничных группах, что обеспечивает повышенную скорость движения устройства (рис. 2а).

Движение по неровной поверхности осуществляется только гусеничными группами (рис. 2б), при этом колесные движители подняты, что обеспечивает повышенную проходимость по сравнению с ровной поверхностью.

Лестничные марши и препятствия сложной геометрической формы могут преодолеваться при одновременном использовании колесных и гусеничных групп, при этом угол положения колесных групп относительно гусеничных групп, длина рычагов и высота выдвижения колесных шипов определяются размерами и формой ступеней лестничного марша и препятствий (рисунки 2в, 2г). Результаты кинематического моделирования показали возможность преодоления роботом различных видов препятствий.

Система управления роботом позволяет в автоматическом режиме реконфигурировать взаимное положение гусениц и колес в зависимости от изменения окружающей обстановки, которая определяется данными от датчиков высоты препятствия, ширины препятствия, угла наклона платформы, расстояния до препятствия, а также наличия следующей верхней и нижней ступеньки на лестничных маршах.

На рис. 3 показаны блоки схемы управления роботом.

Объектом управления является платформа робота с технологическим оборудованием. Блок управления скоростью гусениц и колес задает значения соответствующей скорости

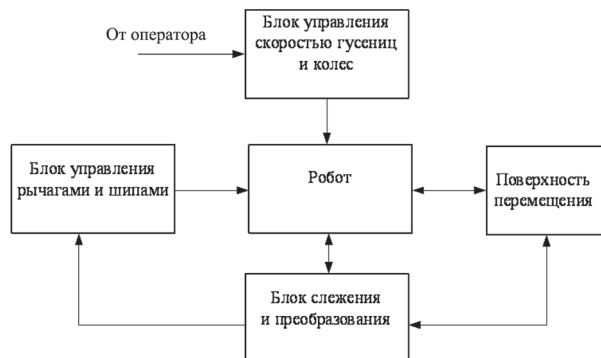


Рис. 3. Схема управления роботом

программно или дистанционно по команде от оператора. Блок слежения и преобразования при помощи датчиков собирает информацию о внешних условиях, преобразует ее и передает на блок управления рычагами и шипами, который в соответствии с этой информацией реконфигурирует определенным образом параметры робота, т.е. управляет наклоном и выдвижением рычагов, а также работой шипов.

Состав блока слежения и преобразования показан на рис. 4.

На рис. 4 приняты следующие обозначения:  $Dш$  – датчик ширины препятствия,  $Dв$  – датчик высоты препятствия,  $Dr$  – датчик расстояния до препятствия,  $Dп$  – датчик угла наклона платформы,  $Dвс$  – датчик наличия следующей ступеньки,  $Dнс$  – датчик наличия следующей нижней ступеньки,  $Lпр$  – длина переднего рычага,  $Lзр$  – длина заднего рычага,  $H1$  – высота шипов передних колес,  $H2$  – высота шипов задних колес,  $Uпр$  – угол наклона переднего рычага,  $Uзр$  – угол наклона заднего рычага,  $МК$  – микроконтроллер.

Получая информацию с датчиков о положении и препятствиях, микроконтроллер подает сигналы для изменения конфигурации параметров конструкции, а именно, длин рычагов, высот шипов и углов наклона рычагов. При перемещении робота меняется текущая информация, получаемая с датчиков, и микроконтроллер на основе этой информации формирует соответствующие управляющие сигналы на приводную систему.

Модель робота и результаты исследований

Экспериментальная модель робота представляет собой уменьшенную копию робота, изготовленную на базе стандартных комплектующих изделий, а именно, колесной группы и гусеничной пары со встроенными приводами, управляемыми с дистанционного пульта.

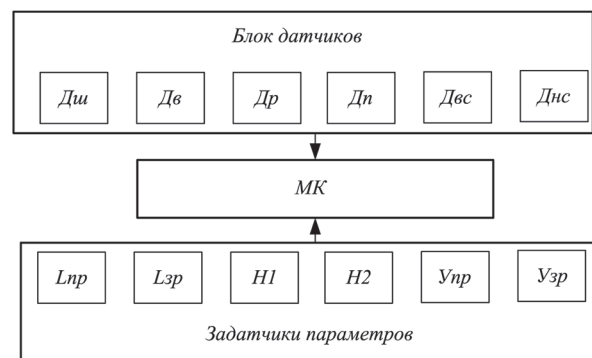


Рис. 4. Блок слежения и преобразования

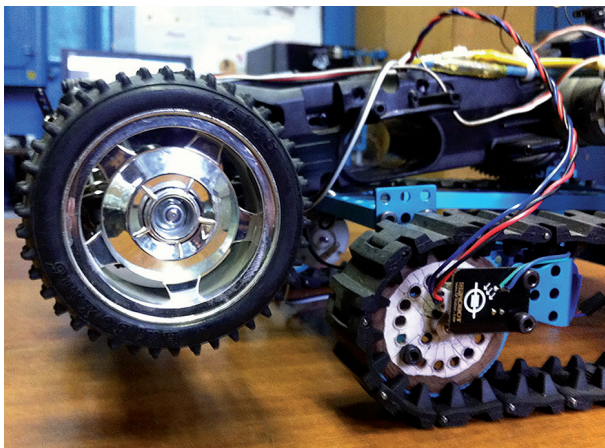


Рис. 5. Общий вид экспериментальной модели

Общий вид экспериментальной модели показан на рисунке 5.

Габаритные размеры модели в положении, показанном на рисунке 5, составляют: длина 500 мм, ширина 250 мм и высота 170 мм. При перемещении колесной группы длина и высота робота, соответственно, изменяются.

В экспериментальной модели робота блок управления приводом каждой гусеницы включает асинхронный двигатель, управляемый преобразователем частоты. Обратная связь по скорости реализована на основе тахогенератора, расположенного на валу двигателя. Сигнал от тахогенератора поступает на входы АЦП, после чего в цифровом виде подается на блок регулировки скорости гусениц, построенного на базе устройства сравнения и цифрового регулятора. Применение регулятора в данной системе позволяет компенсировать изменение скорости движения, связанное с изменением момента на валу двигателя. При увеличении момента скорость вращения снижается. Регулятор корректирует управляющий сигнал таким образом, чтобы поддерживать скорость на постоянном уровне, при этом выполняется контроль максимально возможной частоты переменного тока, поступающей на двигатель.

В приводе рычагов применены двигатели постоянного тока с защитой двигателя от перегрузки и короткого замыкания. Для определения угла наклона рычагов используются сигналы от оптических датчиков, которые преобразовываются в цифровой вид с помощью АЦП. Алгоритм определения необходимого сигнала управления реализован в программе расчета угла наклона и длины рычагов.

Работоспособность конструкции движения проверялась при дистанционном ручном

управлении по радиоканалу. Проверка показала возможность функционирования робота во всех режимах, включая перемещение по лестничным маршам.

Для анализа работы блока управления выдвигением рычагов с параметрами полномасштабного робота было произведено моделирование в приложении *Simulink* пакета прикладных программ *Matlab* с использованием соответствующих стандартных звеньев.

Модель привода управления рычагами представлена на рис. 6.

Входными параметрами для расчета управляющих сигналов задания угла и длины рычагов являются высота препятствия и расстояние до препятствия (рис. 7).

Исходя из схемы расчета управляющий сигнал задания длины рычага определяется формулой:

$$L = \sqrt{h^2 + \Delta L^2},$$

где  $L$  – длина рычага,  $h$  – высота препятствия,  $\Delta L$  – расстояние до препятствия.

Для расчета угла наклона рычага используется формула:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h}{\Delta L}\right),$$

где  $\alpha$  – угол наклона рычагов.

В контуре управления углом наклона рычага используются эталонные звенья, в частности стандартный ПИД-регулятор. При моделировании блока управления рычагами величина высоты препятствия задавалась в форме ступенчатого воздействия, а расстояние до препятствия задавалось линейной функцией с помощью блока *Ramp*, что соответствует процессу приближения к препятствию. Величина расстояния ограничена по нижнему пределу равному нулю с помощью блока *Saturation3*, поскольку данная величина не может быть отрицательной. С помощью блоков *Divide1* и *Trigonometric Function1* рассчитывается величина угла наклона, а с помощью блоков *Product*, *Add* и *Sqrt* выполняется расчет управляющего сигнала длины рычага. Блоки *Saturation*, расположенные после блоков расчета управляющих сигналов, ограничивают данные сигналы по максимально допустимой величине. Например, длина рычага не может быть больше 1,5 м, а угол ограничивается величиной 90°. Нагрузка на привод изменения

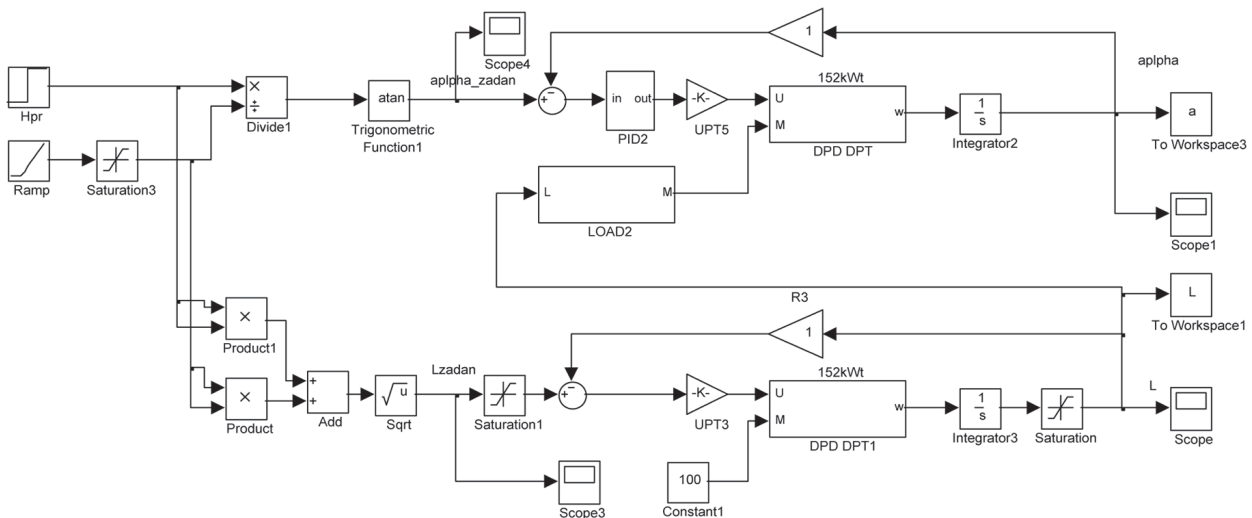


Рисунок 6. Модель привода рычагов:

*Hpr* – сигнал высоты препятствия; *Ramp* – сигнал расстояния до препятствия; *Saturation*, *Saturation1*, *Saturation3* – блоки ограничения сигнала по амплитуде; *Divide1* – блок деления; *Trigonometric Function1* – блок расчета арктангенса; *PID2* – ПИД-регулятор; *DPD DPT* – двигатель привода угла наклона рычага; *DPD DPT1* – двигатель привода длины рычага; *Integrator2*, *Integrator3* – интегрирующие звенья; *LOAD2* – модель нагрузки двигателя привода угла наклона рычага; *UPT3*, *UPT5* – передаточные коэффициенты усилителей постоянного тока; *Product*, *Product1* – блоки умножения; *Add* – блок суммирования; *Sqrt* – блок вычисления квадратного корня; *R3*, *R4* – коэффициенты передачи резистивных датчиков; *Constant1* – задание величины нагрузки на приводе длины рычага; *To Workspace1*, *To Workspace3* – блоки сохранения данных в память; *Scope*, *Scope1* – блоки отображения графиков

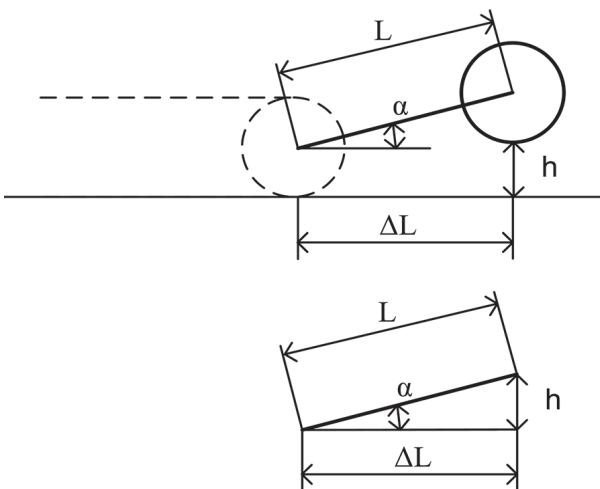


Рис. 7. Схема расчета длины и угла наклона рычагов:

*L* – длина рычага; *h* – высота препятствия;  
 $\Delta L$  – расстояние до препятствия;  
 $\alpha$  – угол наклона рычага

длины рычага считается постоянной и задана константой, а нагрузка на привод изменения угла определяется как сила тяжести робота, действующая на рычаг.

Для исследования разработанной модели в программе *Matlab Simulink* рассматривались переходные процессы, а также выполнялась оценка устойчивости системы несколькими

встроенными в программу методами [5]. Ниже представлены результаты исследования устойчивости блока регулирования длины рычагов, входным параметром которого является расстояние до препятствия, а выходным – длина рычага.

На рис. 8 дана переходная характеристика блока регулирования длины рычагов.

Как видно из графика, форма которого соответствует апериодическому процессу, система является устойчивой, поскольку линия графика стремится к установившемуся значению (в данном случае к 1). На графике нет перерегулирования и колебательных процессов, а время регулирования составляет около 0,3 с.

На импульсной характеристике (рис. 9) отмечается сходящийся к нулевому значению процесс, что также свидетельствует об устойчивости рассматриваемой системы.

По полученным результатам исследования фазочастотной (ФЧХ) и амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) (рис. 10) можно сделать вывод об устойчивости системы, поскольку график АЧХ лежит ниже значения 0.

Таким образом, условие устойчивости выполняется, так как график АЧХ пересекает

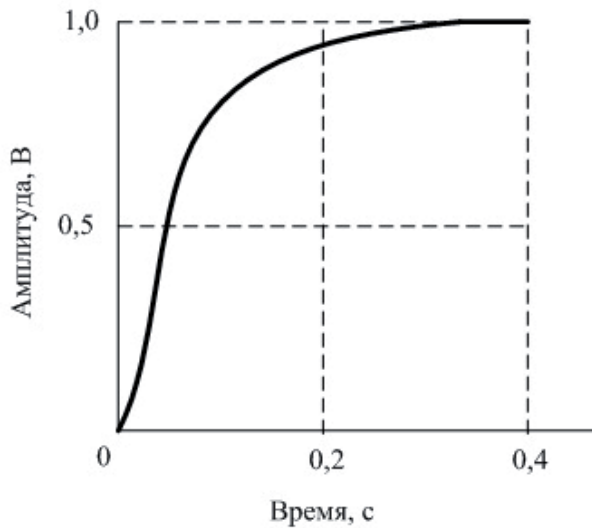


Рис. 8. Переходная характеристика блока регулирования длины рычагов

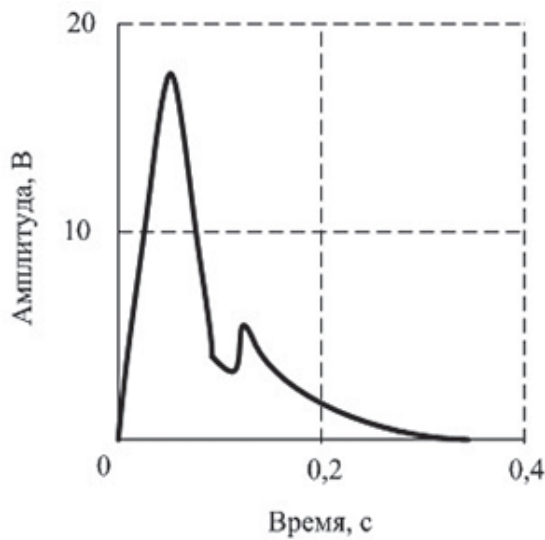


Рис. 9. Импульсная характеристика блока регулирования длины рычагов

нулевое значение ранее, чем график ФЧХ пересекает линию  $180^\circ$ . Запас устойчивости по амплитуде определяется по графику АЧХ как расстояние до оси  $OX$  на частоте, при которой график ФЧХ пересекает линию  $180^\circ$ . В данном случае запас устойчивости равен 12,9 дБ, что отображено на графике.

Дополнительно проверялась устойчивость системы по критерию Найквиста (рис. 11).

При этом условие устойчивости является то, что график годографа не должен охватывать точку с координатами  $(-1, i0)$ . Как видно из полученных результатов, данное условие выполняется, следовательно, система устойчива. Отмеченные на графике точки соответствуют точкам пересечения АЧХ и ФЧХ линий  $0^\circ$  и  $180^\circ$ .

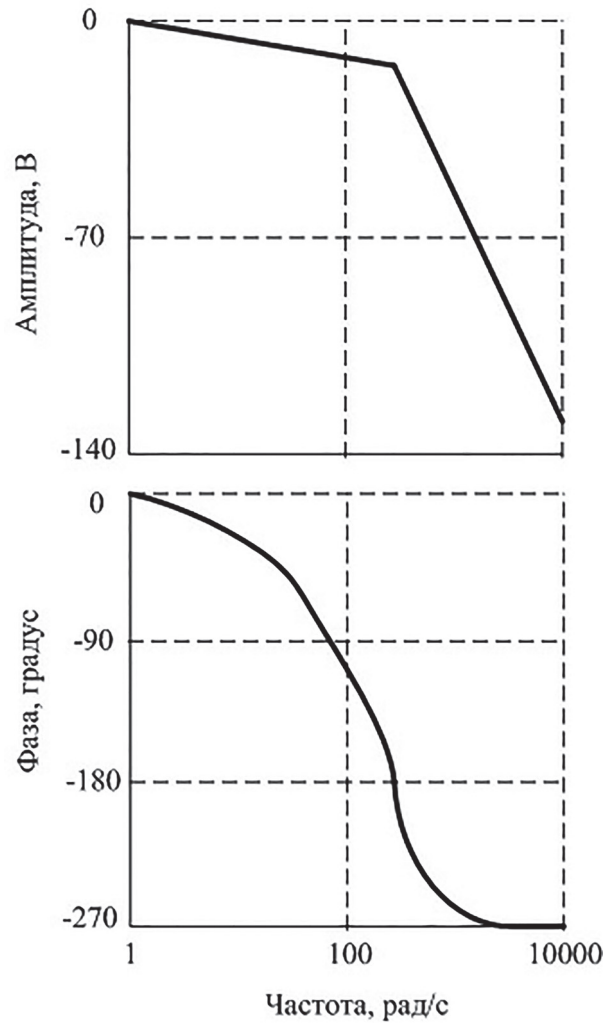


Рис. 10. Графики АЧХ (вверху) и ФЧХ (внизу)

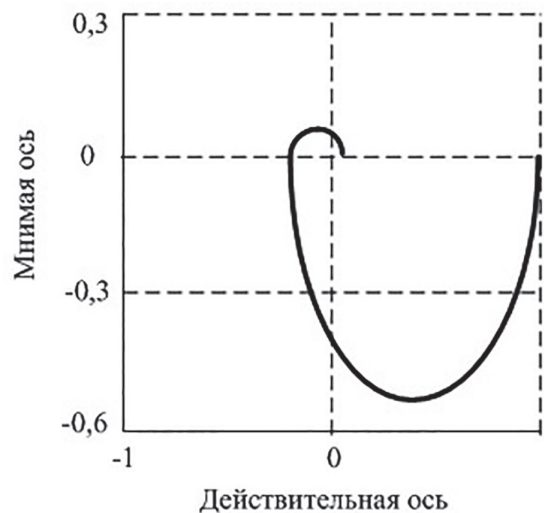


Рис. 11. Годограф Найквиста

Таким образом, проведенное моделирование системы управления приводом длины рычагов подтвердило ее устойчивость по разным критериям.

**Выводы**

Разработана новая схема транспортного робота, позволяющая автоматизировать различные виды работ в зонах повышенной опасности, а также в труднодоступных для человека местах. Система автоматического управления робота спроектирована с возможностью реконфигурации конструкции в зависимости от типа поверхности перемещения и размеров препятствий, определяемых измерительным блоком.

Составлена кинематическая модель робота в среде *SolidWorks* для исследования различных режимов движения робота. Создан экспериментальный образец робота с дистанционным управлением на основе стандартных комплектующих узлов. Его лабораторные испытания подтвердили возможность преодоления различных видов препятствий. Проведено моделирование системы управления выдвиганием рычагов в программе *Matlab Simulink*, которое показало устойчивость работы системы при заданных параметрах. Результаты могут быть использованы при создании полномасштабных роботов.

**Литература**

1. Magnenat S., Philippsen R., Mondada F. Autonomous construction using scarce resources in unknown environments // *Autonomous robots*, Springer Science, Vol. 33, № 1. 2012. P. 467–485.
2. Rachkov M., Marques L., de Almeida A.T. Multisensor demining robot // *Autonomous robots*,

Springer Science, Vol.18, № 3. 2005. P. 275–291.

3. Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций // *Специальная техника*, № 1, 2000. С. 3–15.
4. Рачков М.Ю. Гусенично-колесное транспортное средство // Патент РФ на полезную модель № 53370. 2006.
5. Рачков М.Ю., Смотрин В.А. Моделирование режимов работы автономного гусенично-колесного транспортного средства // *Известия МГИУ*, № 1(24), 2012. С. 46–50.

**References**

1. Magnenat S., Philippsen R., Mondada F. Autonomous construction using scarce resources in unknown environments // *Autonomous robots*, Springer Science, Vol. 33, № 1. 2012. P. 467–485.
2. Rachkov M., Marques L., de Almeida A.T. Multisensor demining robot // *Autonomous robots*, Springer Science, Vol.18, № 3. 2005. P. 275–291.
3. Batanov A.F., Gritsynin S.N., Murkin S.V. Robotic systems for use in emergency situations. *Spetsial'naya tekhnika*, 2000, No 1, pp. 3–15 (in Russ.).
4. Rachkov M.Yu. Gusenichno-kolesnoe transportnoe sredstvo [Caterpillar-wheeled vehicle]. Patent RF na poleznuyu model', No 53370, 2006.
5. Rachkov M.Yu., Smotrin V.A. Simulation of operating modes of autonomous caterpillar-wheeled vehicle. *Izvestiya MGIU*, 2012, No 1(24), pp. 46–50 (in Russ.).

**THE TRANSPORT ROBOT WITH RECONFIGURABLE STRUCTURE**

Dr.Eng. **M.Y. Rachkov**

Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)

+7 917 549-85-09, michyur@gmail.com

*The paper discusses research results of transport robot new design for automation of different kinds of work in emergency situations. The purpose of research is to expand the robot's functional properties due to the possibility of overcoming the various obstacles, as well as high-speed movement on flat surfaces by reconfiguring its structure to the type of surface displacement. The robot has two caterpillar tracks located on each side of the platform for process equipment and two wheeled driving machines mounted on the front and rear of platform between caterpillar track groups. A feature of the design is that the wheel axis of wheeled driving machines is connected with the platform through levers, which drive is located on platform with the possibility of wheeled driving machines movement vertically relative to platform. Lever length could vary that allows to transform robot for different obstacles. A kinematic model of the robot in SolidWorks was developed to study different traffic modes. An experimental sample remote-controlled robot on the basis of standard components nodes was made. Its laboratory tests confirmed the ability to overcome different types of obstacles. The simulation of control system for levers extension in Matlab Simulink was made. It showed the stability of the system at the given parameters. The results can be used to create full-scale robots.*

**Keywords:** transport robot, automation, control, emergency.