

Г.Г. Киракосян, К.А. Аветисян, В.С. Мелконян, А.Г. Погосян, М.Г. Потиян

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫМ РОБОТОМ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА MATLAB

*При проектировании системы управления с обратной связью ключевой проблемой является обеспечение ее устойчивости.*

*Устойчивость системы с обратной связью непосредственно связана с расположением корней ее характеристического уравнения. Важное значение имеют правила, позволяющие определить, устойчива система или нет, не вычисляя при этом корни характеристического уравнения. В данной работе рассмотрен весьма полезный метод анализа устойчивости, известный как критерий Рауса. Этот метод наиболее просто поясняет предложенная в нем таблица. Система управления гусеничным роботом устойчива тогда, когда все элементы первого столбца таблицы Рауса положительны. Если есть хотя бы один отрицательный элемент в первом столбце, то система неустойчива. Найдена также область устойчивости для микропроцессорной системы гусеничного робота с помощью Simulink-модели. В рамках данного исследования было рассмотрено движение робота по окружности (1-я траектория) и равномерное прямолинейное движение (2-я траектория). Рассчитана установившаяся ошибка как для 1-й, так и для 2-й траекторий. Показано, что установившаяся ошибка для 1-й траектории равна нулю, т.е. гусеничный робот точно отслеживает заданный входной сигнал, а установившаяся ошибка для 2-й траектории не превышает 24% от величины линейного входного сигнала. Разработана микропроцессорная система для управления движением гусеничного робота, где настраиваемыми параметрами являются  $K$  и  $d$ . Для получения численного результата при моделировании устойчивости гусеничного робота был использован программный пакет MATLAB.*

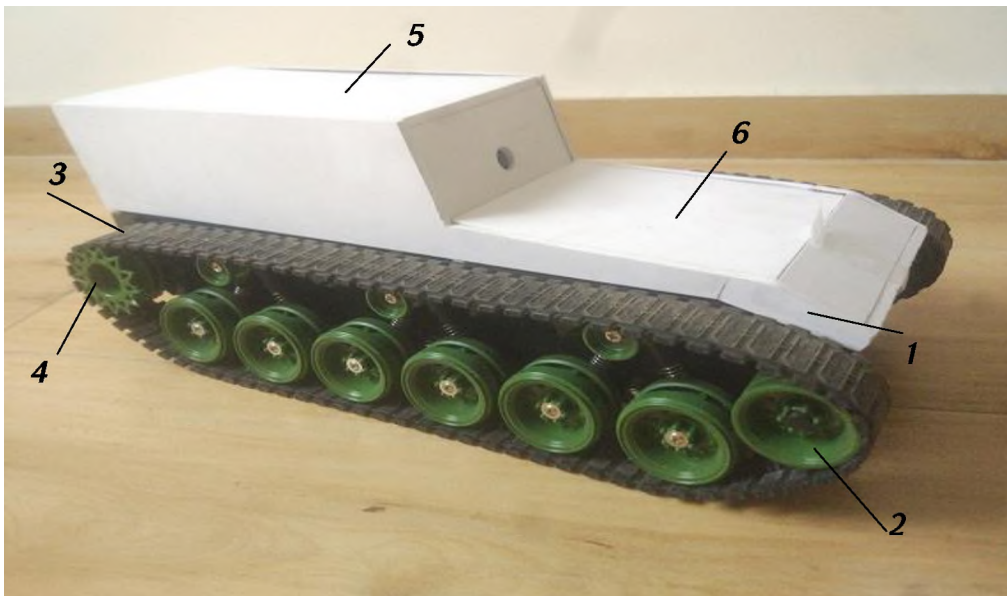
**Ключевые слова:** *гусеничный робот, устойчивость, таблица Рауса, характеристическое уравнение, передаточная функция, обратная связь, функция Хевисайда, скрипт.*

За последние десятилетия мировая робототехника и связанные с ней технологии развиваются стремительными темпами, получая все большую возможность использования мобильных роботов в различных областях человеческой деятельности.

Для решения такого рода задач были разработаны различные типы мобильных роботов, в том числе колесные, гусеничные, шагающие, беспилотные летательные аппараты [1, 2]. В данной работе рассматривается мобильный гусеничный робот, предназначенный для проведения поисковых операций. Выбор гусеничного движителя обусловлен рядом преимуществ, а именно: маневренность, высокая проходимость, надежный контакт с поверхностью.

Целью данной работы является разработка микропроцессорной системы для анализа движения, улучшения характеристик и устойчивости гусеничного робота.

**1. Описание конструкции и принципа движения гусеничного робота.** Конструкция гусеничного робота показана на рис. 1.



**Рис. 1. Внешний вид гусеничного робота**

**1. корпус, 2. ведущий каток, 3. гусеница, 4. ведомый каток, 5. система автоматического управления электроприводами устройства, 6. батареи питания**

Робот перемещается за счет сил трения, возникающих между опорной поверхностью (грунтом) и гусеничным движителем робота. Ведущий каток соединен посредством редуктора с двигателем постоянного тока, управляемым системой автоматического регулирования. Проскальзывание между ведущими катками и гусеницей отсутствует, поэтому угловые скорости вращения катков (ведущих и ведомых) равны.

В зависимости от алгоритма перемещения и информации с датчиков, система автоматического регулирования формирует управляющие напряжения для электроприводов устройства. Для усиления слабых сигналов с контроллера системы управления используются силовые транзисторные ключи-драйверы двигателей.

Для поворота в горизонтальной плоскости система управления формирует различное напряжение питания для каждого из гусеничных движителей [3]. Система навигации робота может включать как ультразвуковые датчики расстояния, оптические линейки для перемещения по контрастной линии, так и контактные датчики препятствий.

## **2. Система управления гусеничным роботом при движении по окружности.**

Характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид:

$$1 + H(s)G(s) = 0, \quad (1)$$

где  $H(s) = (s + a)/(s + 2)$  – передаточная функция регулятора;  
 $G(s) = K/[s(s + 3)(s + 7)]$  – передаточная функция гусеничного робота.

Разработка системы управления движением робота по окружности заключается в выборе двух параметров. На рис. 2 изображена структурная схема этой системы. Чтобы осуществить движение по окружности, две гусеницы должны двигаться с разными скоростями. Необходимо выбрать параметры  $K$  и  $a$  так, чтобы система была устойчива, и чтобы при линейном входном сигнале установившаяся ошибка не превышала 24% от величины этого сигнала [4].

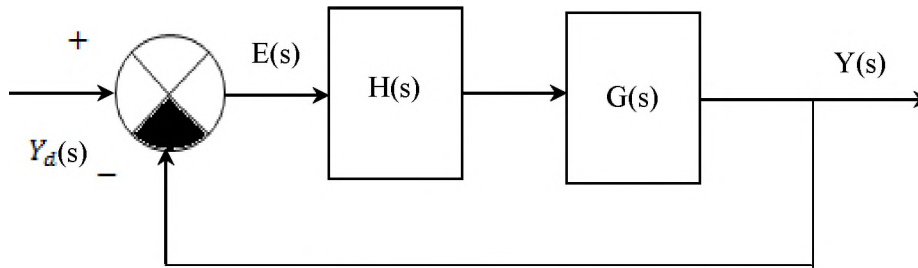


Рис. 2. Структурная схема системы

Учитывая формулы для  $H(s)$  и  $G(s)$ , уравнение (1) приведем к виду

$$a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0, \quad (2)$$

где  $a_4 = 1$ ,  $a_3 = 12$ ,  $a_2 = 41$ ,  $a_1 = (K + 42)$ ,  $a_0 = Ka$ .

Чтобы найти область устойчивости в плоскости параметров  $K$  и  $a$ , составим таблицу, где  $n$  - порядок характеристического уравнения [5].

Таблица 1.

Таблица Рауса

$r$	Номер строки	Номер столбца		
		1	2	3
	-	$a_n = a_4 = 1$	$a_{n-2} = a_2 = 17$	$a_{n-4} = a_0 = Ka$
-	$a_{n-1} = a_3 = 12$	$a_{n-3} = a_1 = (k + 42)$	$a_{n-5} = a_{-1} = 0$	
$r_1 = \frac{a_n}{a_{n-1}} = \frac{a_4}{a_3}$	1	$c_{11} = \frac{492 - (k + 42)}{12}$	$c_{12} = Ka$	$c_{13} = 0$
$r_2 = \frac{a_{n-1}}{c_{11}} = \frac{a_3}{c_{11}}$	2	$c_{21} = \frac{c_{11}(k + 42) - 12Ka}{c_{11}}$	$c_{22} = 0$	$c_{23} = 0$
$r_3 = \frac{c_{11}}{c_{21}}$	3	$c_{31} = Ka$	$c_{32} = 0$	$c_{33} = 0$

Для того чтобы элементы первого столбца были положительными, параметры  $Ka$ ,  $c_{11}$  и  $c_{21}$  должны быть больше нуля. Следовательно, должны выполняться неравенства

$$K < 450,$$

$$Ka > 0 \quad (3)$$

$$(K + 42)(450 - K) - 144Ka > 0.$$

Нахождение области устойчивости в плоскости параметров  $(K, a)$  для системы управления гусеничным роботом осуществляется с помощью Simulink-модели (рис. 3). Для формирования

Simulink–модели области устойчивости были использованы следующие блоки: Ramp, Constant, Sum, Product, Divide, To Workspace, Scope. Для визуализации сигнала, охватывающего область устойчивости, в рабочую область перенесен виртуальный измерительный прибор Scope из библиотеки Simulink в открытом окне Simulink Library Browser. Область устойчивости изображена на рис. 4. Регулятор  $H(s)$  выполняет задачу управления гусеничным роботом в замкнутой системе, обеспечивая, чтобы действительное положение робота  $y(t)$  становилось как можно ближе и быстрее к заданной (желаемой) входной функции  $y_d(t)$ . В любом случае успешная система управления должна приблизить  $y(t)$  как можно ближе к  $y_d(t)$ , когда время стремится к бесконечности. Такая система называется системой слежения, поскольку ее действительная выходная функция  $y(t)$  постоянно отслеживает изменение заданного (желаемого) входного сигнала  $y_d(t)$ . Ошибка  $e(t) = y_d(t) - y(t)$ , которая сохраняется в пределе  $t \rightarrow \infty$ , называется установившейся ошибкой. Для установившейся ошибки получим

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t).$$

Обозначив изображения Лапласа функций  $y(t)$ ,  $y_d(t)$  и  $e(t)$  через  $Y(s)$ ,  $Y_d(s)$  и  $E(s)$  соответственно и используя важное свойство преобразования Лапласа, а именно - теорему об окончательном значении, находим

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s).$$

После несложных преобразований  $e_{ss}$  будет иметь вид

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sY_d(s)}{1+G(s)H(s)}.$$

В дальнейшем рассматриваются две траектории для движения робота, т.е. движение по окружности и равномерное прямолинейное движение. Первая траектория в параметрическом виде описывается формулой

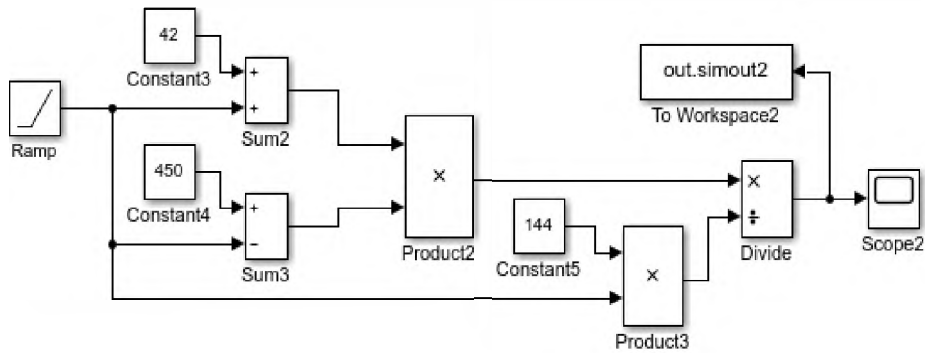
$$\begin{aligned} x(t) &= R \sin(\omega t), \\ y(t) &= R \cos(\omega t), \end{aligned}$$

где  $R$  – радиус окружности, а  $\omega$  – угловая скорость робота. Для  $x$ -компоненты движения робота по окружности изображение имеет вид.

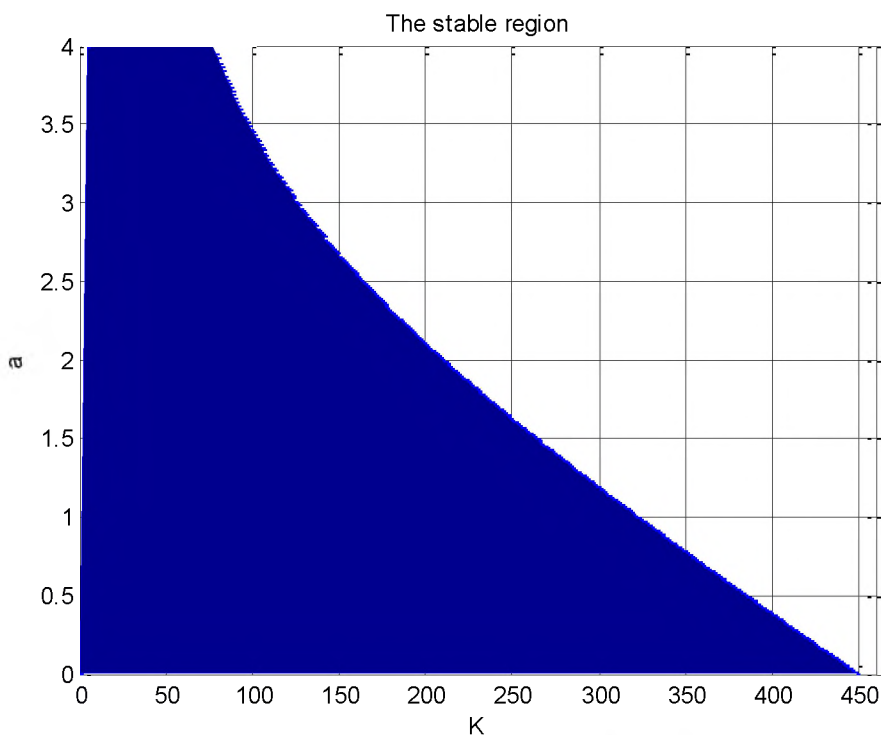
$$Y_d(s) = \frac{\omega R}{s^2 + \omega^2}.$$

Подставив это выражение в формулу для  $e_{ss}$ , получим, что  $e_{ss} = 0$ . Для  $y$ -компоненты движения робота по окружности можно повторить аналогичный расчет и убедиться, что снова  $e_{ss} = 0$ . То есть в случае 1-й траектории гусеничный робот точно отслеживает заданный входной сигнал. Вторая траектория описывается формулой  $y_d(t) = At u_s(t)$ , где  $u_s(t)$  – единичная функция Хевисайда. Подставив формулы для  $Y_d(s) = A/s^2$ ,  $H(s)$  и  $G(s)$  в выражение для  $e_{ss}$ , получим

$$e_{ss} = \frac{42A}{Ka}. \quad (4)$$



**Рис. 3. Simulink-модель для области устойчивости**



**Рис. 4. Область устойчивости**

Если выбрать  $Ka = 175$ , то получим  $e_{ss} = 24\%$ . Это условие можно удовлетворить, задав точку в области устойчивости с параметрами  $K = 250$  и  $a = 0,7$ . Другое возможное сочетание параметров:  $K = 200$  и  $a = 0,87$ . Можно определить и ряд других комбинаций параметров, дающих произведение  $Ka = 175$  и лежащих в области устойчивости. Однако, как видно из рис. 4, параметр  $K$  не может превышать 450.

3. **Анализ устойчивости гусеничного робота.** На рис. 2 изображена структурная схема системы управления движением робота по окружности. Цель разработки состоит в выборе параметров  $K$  и  $a$ , при которых система будет устойчива, и установившаяся ошибка при линейном входном сигнале не будет превышать 24% от величины этого сигнала. Для решения этой задачи нами был использован критерий Рауса [6].

Из таблицы Рауса были получены два условия устойчивости:  $K < 450$  и  $Ka > 0$ . Это значит, что можно ограничить область поиска значениями  $0 < K < 450$  и  $a > 0$ . Сначала с помощью программного средства MATLAB найдем границу устойчивости в плоскости параметров  $K$  и  $a$ . Затем найдем пары значений  $(K, a)$ , принадлежащих области устойчивости, которые удовлетворяли бы ограничению на установившуюся ошибку. Эта процедура включает в себя задание диапазона значений  $K$  и  $a$  и вычисление корней характеристического уравнения для конкретных значений этих параметров. Для каждого  $K$  найдем первое значение  $a$ , при котором по крайней мере один корень характеристического уравнения попадает в правую полуплоскость. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет пройден весь диапазон значений  $K$  и  $a$ . Найденные пары чисел  $(K, a)$  определяют границу между областями устойчивости и неустойчивости.

Функция, отделяющая область устойчивости от области неустойчивости, имеет следующий вид:

$$a = \frac{(K+42)(450-K)}{144K}.$$

При заданном ограничении  $e_{ss} < 0,24A$  имеем

$$\frac{42A}{Ka} < 0,24A,$$

или

$$Ka > 175. \quad (5)$$

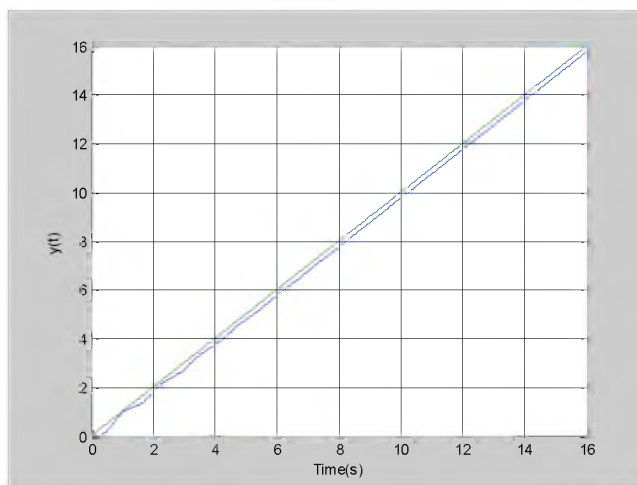
Любые значения  $K$  и  $a$ , лежащие в области устойчивости на рис. 4 и удовлетворяющие условию (5), будут считаться приемлемыми. Например, значения  $K = 250$  и  $a = 0,7$  будут удовлетворять всем выдвинутым требованиям. При этих значениях передаточная функция замкнутой системы примет вид

$$\frac{Y(s)}{Y_d(s)} = \frac{250s + 175}{s^4 + 12s^3 + 41s^2 + 252s + 175}.$$

Полусы замкнутой системы будут иметь значения

$$s = -10,5852, s = -0,6476, s = -0,3836 + 5,0378i \text{ и } s = -0,3836 - 5,0378i.$$

Реакция системы на линейный входной сигнал, изменяющийся с единичной скоростью, приведена на рис. 5. Установившаяся ошибка менее 0,24, что и требовалось доказать.



**Рис. 5. Реакция микропроцессорной системы управления криволинейным движением робота на линейный входной сигнал**



Разработана микропроцессорная система для управления движением гусеничного робота по окружности. Проведен также анализ устойчивости гусеничного робота с помощью программного средства MATLAB. При исследовании устойчивости робота были использованы алгебраические критерии, в частности, критерий Рауса. Частотные критерии устойчивости в данной работе не рассматривались.

### Литература

1. **Туладхар Д., Тарасова Е.С.** Исследование процесса торможения двухколесного транспортного средства в сложных дорожных условиях // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010.- Т. 12, N 3-4. – С. 634-636.
2. **Киракосян Г.Г.,** Аветисян К.А., Потикян М.Г., Проектирование системы управления беспилотным летательным аппаратом с помощью системы MATLAB, Кризисное управление и технологии. Ер. – N2 (21). 2022.– С. 22-32.
3. **Wang G.G.** Design of turning control for a tracked vehicle // IEEE Control Systems. – April 1990.- P. 122-125.
4. **Tewari A.** Modern control design with MATLAB and Simulink. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 503 p.
5. **Воронова А.А.** Теория автоматического управления. Часть 1// Под ред. – М.: Высшая школа, 1977. – 153 с.
6. **Ефимов М.В.** Теория автоматического управления. – М.: МГУП, 2006. – 420 с.

**Գ.Հ. Կիրակոսյան, Բ.Ա. Ավետիսյան, Վ.Ս. Մելքոնյան, Ա.Գ. Պողոսյան, Մ.Գ. Փոթիկյան**

### **ԹՐԹՈՒՐԱՎՈՐ ՌՈՐՈՒԿԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ MATLAB ՓԱԹԵԹԻ ՄԻՋՈՑՈՎ**

*Հեղադարձ կապով կառավարման համակարգ նախագծելիս առանցքային խնդիր է հանդիսանում նրա կայունության ապահովումը:*

*Հեղադարձ կապով համակարգի կայունությունն անմիջականորեն կապված է նրա բնութագրական հավասարման արմարների տեղակայման հետ: Կարևոր նշանակություն ունեն այն կանոնները, որոնք թույլ են տալիս որոշել՝ կայուն է համակարգը, թե ոչ, առանց բնութագրական հավասարման արմարները հաշվելու: Հոդվածում դիտարկվում է կայունության վերլուծության օգտակար մեթոդ, որը հայտնի է որպես Ռաուսի չափանիշ: Մեթոդի էությունն ավելի պարզ բացահայտվում է նրա առաջարկած աղյուսակով: Թրթուրավոր ոռոտրի կառավարման համակարգը կայուն է, երբ Ռաուսի աղյուսակի առաջին սյունակի բոլոր տարրերը դրական են: Եթե առաջին սյունակում կա առնվազն մեկ բացասական տարր, ապա համակարգն անկայուն է: Որոշվել է նաև թրթուրավոր ոռոտրի համար միկրոպրոցեսորային համակարգի կայունության տիրույթը Simulink մոդելի միջոցով: Սույն հեղադրության շրջանակներում դիտարկվել է ոռոտրի շրջանագծով շարժումը (1-ին հեղադրի) և ուղղագիծ հավասարաչափ շարժումը (2-րդ հեղադրի): Հաշվարկվել է հաստատված սխալը ինչպես 1-ին հեղադրի, այնպես էլ 2-րդ հեղադրի դեպքում: Ցույց է տրվել, որ հաստատված սխալը 1-ին հեղադրի*

համար հավասար է զրոյի, այսինքն թրթուրավոր ոռոգորը ճշգրտորեն հեղուկում է տրված մուտքային ազդանշանին շրջանագծի տեսքով: Ցույց է տրվել, որ հաստատված սխալը 2-րդ հերթագծի դեպքում չի գերազանցում գծային մուտքային ազդանշանի մեծության 24%-ը: Մշակվել է միկրոպրոցեսորային համակարգ՝ թրթուրավոր ոռոգորի շարժման կառավարման համար, որտեղ համալարման պարամետրերն են  $K$ -ն և  $a$ -ն: Թրթուրավոր ոռոգորի կայունության մոդելավորման ժամանակ թվային արդյունքներ ստանալու համար օգտագործվել է MATLAB փաթեթը:

**Առանցքային բառեր.** թրթուրավոր ոռոգոր, կայունություն, Ռաուսի աղյուսակ, բնութագրական հավասարում, փոխանցման ֆունկցիա, հետադարձ կապ, Հևիսայդի ֆունկցիա, ծրագրային կոդ:

G.H. Kirakosyan, K.A. Avetisyan, V.S. Melkonyan, A.G. Poghosyan, M.G. Potikyan

## DESIGNING OF THE CONTROL SYSTEM BY A TRACKED ROBOT USING THE MATLAB PACKAGE

*When designing a feedback control system, the key issue is to ensure its stability. The stability of a feedback system is directly related to the location of the roots of its characteristic equation. The rules that allow to determine whether the system is stable or not without calculating the roots of the characteristic equation are important. In this paper, a very useful method of stability analysis is considered, known as the Routh method. This method is most simply explained by the Table he proposed. The tracked robot control system is stable when all elements of the first column of the Routh Table are positive. If there is at least one negative element in the first column, then the system is unstable. The stable region for the microprocessor system of a tracked robot was also found using the Simulink model. Within the framework of this study, the movement of the robot in a circle (1st trajectory) and uniform rectilinear movement (2nd trajectory) were considered. The steady-state error is calculated for both the 1st trajectory and the 2nd one. It is shown that the steady-state error for the 1st trajectory is equal to zero, i.e. the tracked robot accurately tracks the given input signal. It is shown that the steady-state error for the 2nd trajectory does not exceed 24% of the value of the linear input signal. A microprocessor system has been developed to control the movement of a tracked robot, where the adjustable parameters are  $K$  and  $a$ . To obtain a numerical result in modeling the stability of a tracked robot, the MATLAB package was used.*

**Keywords:** tracked robot, stability, Routh array, characteristic equation, transfer function, feedback, Heaviside function, script.

**Киракосян Гагик Грачинович** – кандидат ф.- м.н., доцент, НПУА.

**Аветисян Каджик Аветисович** – кандидат т.н., доцент (НПУА).

**Мелконян Вачаган Сосевич** – лектор (НПУА).

**Погосян Аревшат Гургенович** – кандидат ф.- м.н., доцент (НПУА).

**Потикян Марина Гарниковна** – кандидат э.н, ассистент (ГАКУ МВД РА, Ереванский государственный колледж информатики).

Дата представления: 03.03.2023

Дата рецензии: 03.03.2023