

Научная статья  
УДК 681.5  
doi: 10.34822/1999-7604-2022-4-14-22

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШАГАТЕЛЬНОГО ЦИКЛА РОБОТА НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

Георгий Сергеевич Васильянов<sup>1</sup>, Алексей Александрович Лавров<sup>2✉</sup>,  
Анатолий Викторович Лупин<sup>3</sup>, Игорь Алексеевич Малышев<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> g.vasilyanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2115-6947>

<sup>2</sup> lavrov\_aa@spbstu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-5299-4789>

<sup>3</sup> lupin\_av@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1920-069X>

<sup>4</sup> malyshev\_ia@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8035-4401>

**Аннотация.** Рассмотрен алгоритм ситуационного управления движениями четырехногого робота, основанный на построении и оптимизации регрессионной модели в среде Gazebo. Представлены результаты вычислительных экспериментов влияния длины и высоты шага и времени переноса ноги на снижение до минимально возможного уровня колебаний его корпуса по углам крена и тангажа.

При описании поверхности отклика, предполагаемо имеющей экстремумы, применена регрессионная модель в виде полинома второго порядка, а с целью сокращения числа опытов при ее построении использован ортогональный центральный композиционный план. Описан процесс получения регрессионной модели, оценки значимости ее коэффициентов, оценки адекватности регрессионной модели виртуальной модели робота в среде Gazebo, приведены результаты оптимизации параметров шагательного цикла при помощи симплекса метода Нелдера – Мида в среде Matlab, применение которого возможно при оптимизации параметров систем управления по другим критериям.

**Ключевые слова:** шагающий четырехногий робот, система управления, симулятор Gazebo, регрессионная модель

**Для цитирования:** Васильянов Г. С., Лавров А. А., Лупин А. В., Малышев И. А. Оптимизация параметров шагательного цикла робота на основе регрессионной модели // Вестник кибернетики. 2022. № 4 (48). С. 14–22. DOI 10.34822/1999-7604-2022-4-14-22.

Original article

## OPTIMIZING PARAMETERS OF THE ROBOT STEPPING CYCLE BASED ON THE REGRESSION MODEL

Georgy S. Vasilyanov<sup>1</sup>, Aleksey A. Lavrov<sup>2✉</sup>, Anatoly V. Lupin<sup>3</sup>, Igor A. Malyshev<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> g.vasilyanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0003-2115-6947>

<sup>2</sup> lavrov\_aa@spbstu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-5299-4789>

<sup>3</sup> lupin\_av@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1920-069X>

<sup>4</sup> malyshev\_ia@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8035-4401>

**Abstract.** The article considers an algorithm for situational control of a quadruped dog, based on building and optimizing a regression model in Gazebo. The results of simulation experiments demonstrate the effect of step length and height as well as leg transfer time on the minimum possible decrease in the roll and pitch angles of the robot body.

A regression model in the form of a second-order polynomial was used to describe the response surface with supposed extremes. When building such a regression model, an orthogonal central composite plan was

applied in order to minimize the number of experiments. The study describes the process of obtaining a regression model, determining its coefficients significance, and evaluating the adequacy of the regression model's virtual robot model in the Gazebo simulator. The results of parameter optimization for a stepping cycle are shown in Matlab using the simplex of the Nelder–Mead method, which can be applied when optimizing parameters of control systems according to other criteria.

**Keywords:** walking quadruped robot, control system, Gazebo simulator, regression model

**For citation:** Vasilyanov G. S., Lavrov A. A., Lupin A. V., Malyshev I. A. *Optimizing Parameters of the Robot Stepping Cycle Based on the Regression Model // Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 4 (48). P. 14–22. DOI 10.34822/1999-7604-2022-4-14-22.*

## ВВЕДЕНИЕ

Шагающие роботы (ШР) имеют более высокую проходимость по сравнению с колесными, поэтому основной сферой применения ШР является исследование участков сильно пересеченной местности и опасных для человека. Учитывая возможные условия передвижения ШР по маршруту с ровными и неровными поверхностями, твердому или мягкому грунту, необходимо использовать ситуационный подход, и для каждой ситуации разработать алгоритм, который позволит выполнить задачу с максимальной эффективностью, т. е. разбить общий алгоритм управления на частные алгоритмы с оптимальными параметрами для конкретных условий [1]. Выбор алгоритма из возможных для конкретной ситуации решает более высокий уровень системы управления ШР.

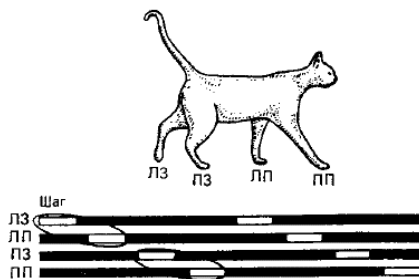
Рассмотрен алгоритм ситуационного управления движением четырехногого робота по плоской поверхности с обеспечением снижения колебаний корпуса по углам крена и тангажа до минимально возможного уровня, что важно, например, при использовании ШР для видеосъемки. Для проектирования робота и его системы управления использовали моделирование в среде универсального симулятора Gazebo [2, 3] при соответствии параметров модели параметрам опытного образца [4]. При проведении вычислительных экспериментов установлено, что на углы крена и тангажа корпуса робота значительно влияют длина шага, высота на которую робот поднимает ногу, и временной интервал между сменами подшагов. Применение численных методов оптимизации, например, метода градиентного спуска или

метода наискорейшего спуска позволяют найти оптимальное значение целевой функции, но сам процесс поиска не дает полной информации о поверхности отклика. Поэтому в работе исследуется метод, основанный на построении регрессионной модели по результатам моделирования ШР в среде Gazebo и проводимой по этой модели оптимизации [5]. При описании поверхности отклика, предполагаемо имеющей экстремумы, чаще всего применяют регрессионные модели в виде полинома второго порядка, а с целью сокращения числа опытов при построении моделей используют ортогональные центральные композиционные планы. Такой подход применяется при моделировании и оптимизации объектов в самых различных областях, например, горном деле, транспорте, робототехнике [6–10].

В работе описан процесс получения регрессионной модели, оценки значимости ее коэффициентов и адекватности регрессионной модели виртуальной модели робота в среде Gazebo, приведены результаты оптимизации параметров шагательного цикла при помощи симплекс метода Нелдера – Мида в среде Matlab. Произведена оценка соответствия полученных расчетных данных данным, полученным при проведении испытаний опытного образца робота.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для четырехногих роботов используется один из самых распространенных типов походок животных – шаг кошки или собаки. Шаг является наиболее экономным видом движения при неспешной ходьбе и позволяет сохранять равновесие [11], поэтому за основу была взята именно эта манера движения (рис. 1).



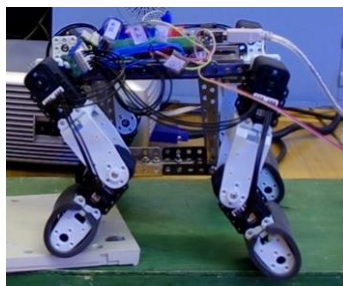
**Рис. 1.** Движения ног кошки при походке типа шаг

*Примечание:* составлено по [4].

На рис. 1 светлые горизонтальные полосы – фазы времени, когда стопа в воздухе; темные полосы – фазы, когда стопа опирается на поверхность. Обозначения ног: ЛЗ – левая зад-

няя, ЛП – левая передняя, ПЗ – правая задняя, ПП – правая передняя нога.

Фотография опытного образца четырехногого ШР приведена на рис. 2.



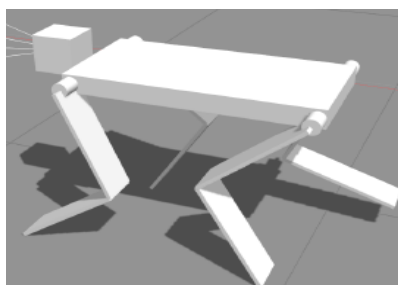
**Рис. 2.** Фотография опытного образца шагающего робота

*Примечание:* составлено авторами.

Система управления ШР, выполненная на основе платы Arduino Mega2560 формирует микрокоманды управления восемью сервоприводами (по два на каждую ногу). Используются «интеллектуальные» сервоприводы фирмы Dynamixel AX-12 со встроенным микроконтроллером, позволяющим в пакетном режиме не только получать команды от системы управления (СУ), но и отправлять на СУ данные о состоянии, в частности, текущем угле поворота, текущей нагрузке, моменте, приложенному к выходному валу, скорости и т. д.

Разработан алгоритм формирования циклограммы, обеспечивающей шагательный цикл типа «кошка» [3, 4].

На рис. 3 приведено изображение динамической модели ШР в среде симулятора Gazebo. Параметры ног и туловища модели – массы и длины бедра и голени, масса и размеры туловища, параметры сервоприводов соответствуют параметрам опытного образца робота. Проведенные испытания опытного образца и модели показали удовлетворительное совпадение их перемещений и движений [3].



**Рис. 3.** Модель шагающего робота в среде симулятора Gazebo

*Примечание:* составлено авторами.

Каждая нога робота поочередно выполняет движение согласно диаграмме на рис. 1. Траектория движения каждой стопы представляет собой прямоугольник. Для каждой точки траектории, заданной с некоторой дискретностью, СУ вычисляет углы поворота сервоприводов

в градусах по результатам решения задачи обратной кинематики.

На рис. 4 приведена кинематическая схема задней ноги робота. Направление движения противоположно оси ОХ [4].

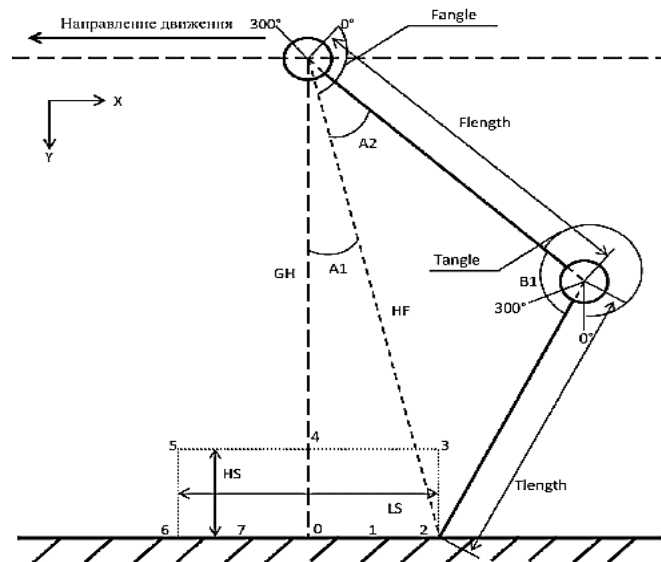


Рис. 4. Формирование траектории перемещения ноги робота:

GH (Ground Height) – расстояние от точки опоры ноги робота до поверхности; Flength (Femur Length) – длина «бедра» ноги робота, ее первого звена (P1); Tlength (Tibia Length) – длина «голени» ноги робота, ее второго звена (P2); HS (Height of Step) – высота шага ноги робота; LS (Length of Step) – длина шага ноги робота; HF (Height of Full leg) – длина ноги робота; A1, A2 – углы, из которых складывается результирующий угол поворота сервопривода, отвечающего за сегмент P1 ноги робота; B1 – угол, из которого складывается результирующий угол поворота сервопривода, отвечающего за сегмент P2 ноги робота.

Примечание: составлено авторами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный алгоритм перерасчета циклограмм движения ног использует в качестве входных данных три переменные: расстояние до поверхности (GH – Ground Height, HS – Height of Step) – высота шага ноги робота, и LS (Length of Step) – длина шага ноги робота. При этом алгоритму требуются 2 константных параметра – длина голени Tlength и длина бедра Flength ноги робота. Параметры GH, HS и LS задаются в процессе движения [4]. Изменяя LS можно осуществлять повороты.

В ходе работы с моделью ППР выявлено, что на амплитуду колебаний корпуса робота влияют следующие факторы: длина шага (LS), высота подъема ноги (HS) и время подшага (затраченное на формирование траектории каждой ноги) – TD.

Формула зависимости амплитуды колебаний от этих факторов имеет вид:

$$Y = F(TD, HS, LS).$$

Временные диаграммы углов крена (Roll) и тангажа (Pitch) для одного из возможных сочетаний LS, HS и TD приведены на рис. 5.

Для проведения экспериментов согласно ортогональному центральному композиционному плану (ОЦКП) необходимо привести входные переменные к кодированному виду, для этого выбраны пределы изменений факторов: нижнему пределу присвоено значение «-1», среднему – «0», верхнему – «1» (табл. 1). Пределы изменения факторов были выбраны исходя из допускаемых экспериментальной установкой или моделью робота пределов изменений.

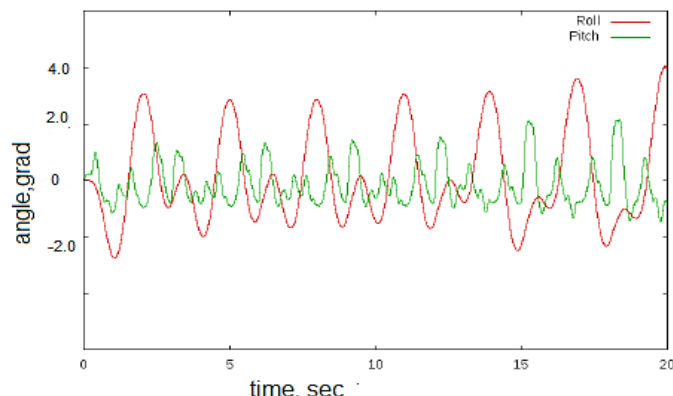


Рис. 5. Временные диаграммы углов крена (Roll) и тангажа (Pitch)  
 Примечание: составлено авторами.

Таблица 1

Данные для проведения ОЦКП

Факторы	Время подшага, мс	Высота подъема ноги, м	Длина шага, м
Обозначение	TD	HS	LS
Обозначения в ОЦКП	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Верхний предел (1)	300	0,06	0,08
Основной уровень (0)	200	0,04	0,06
Нижний предел (-1)	100	0,02	0,04

Примечание: составлено авторами.

После приведения переменных к кодированному виду формула зависимости амплитуды колебаний от факторов будет иметь вид:  $y = f(x_1, x_2, x_3)$ .

Проведение вычислительных экспериментов проводится согласно обозначенной в табл. 2

матрице ОЦКП [12]. В ходе экспериментов были измерены углы крена и тангажа в градусах средствами среды Gazebo. Значения углов крена приведены в табл. 3 и использованы для расчетов по табл. 2.

Таблица 2

Матрица ОЦКП

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$y$
1	+1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	+1	+1	+1	$y_1$
2	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	+1	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	+1	-1	-1	$y_4$
5	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	+1	-1	-1	$y_5$
6	+1	+1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	+1	+1	-1	$y_6$
7	+1	-1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	+1	$y_7$
8	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	+1	+1	+1	$y_8$
9	+1	-1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0	$y_9$
10	+1	+1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0	$y_{10}$
11	+1	0	-1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	$y_{11}$
12	+1	0	+1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	$y_{12}$
13	+1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	$y_{13}$
14	+1	0	0	+1,215	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	$y_{14}$
15	+1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	$y_{15}$

Примечание: составлено авторами.

**Значения углов крена**

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15
2,74	4,22	2,25	3,08	2,96	3,7	2,38	2,8	2,34	3,1	3,92	2,65	2,82	2,96	3,08

Примечание: составлено авторами.

По результатам проведения эксперимента согласно трехфакторному ОЦКП строится зависимость:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2,$$

где  $b_1 = \sum_{i=1}^n (x_{1i}y_i)/10,94 = 0,40;$   
 $b_2 = \sum_{i=1}^n (x_{2i}y_i)/10,94 = -0,43;$   
 $b_3 = \sum_{i=1}^n (x_{3i}y_i)/10,94 = -0,025;$   
 $b_{12} = \sum_{i=1}^n (x_{1i}x_{2i}y_i)/8,0 = -0,122;$   
 $b_{13} = \sum_{i=1}^n (x_{1i}x_{3i}y_i)/8,0 = -0,0144;$   
 $b_{23} = \sum_{i=1}^n (x_{2i}x_{3i}y_i)/8,0 = 0,0193;$   
 $b_{11} = \sum_{i=1}^n (x_{1i}^2y_i)/4,34 = -0,154;$   
 $b_{22} = \sum_{i=1}^n (x_{2i}^2y_i)/4,34 = 0,231;$   
 $b_{33} = \sum_{i=1}^n (x_{3i}^2y_i)/4,34 = -0,038;$   
 $b_0 = \sum_{i=1}^n (x_{0i}y_i)/15,0 - 0,73(b_{11} + b_{22} + b_{33}) = 2,97.$

В приведенных формулах  $i$  – номер опыта,  $n$  – число опытов в эксперименте,  $n = 15$ .

Чтобы произвести оценку значимости коэффициентов регрессии необходимо определить дисперсию опыта в нулевой точке плана по формуле:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^K (y_j - \bar{y}_j)^2 / (K - 1),$$

где  $K$  – число параллельных опытов в нулевой точке плана,  $\bar{y}_j$  – среднее значение  $y_j$ , вычисленное для параллельных опытов.

В случае выполнения экспериментов на модели результаты в каждом параллельном опыте не будут отличаться друг от друга, и дисперсия опыта  $S_y^2$  будет равна нулю. При реальных экспериментах дисперсия  $S_y^2$  будет отличаться от нуля, поэтому ее значение задают искусственным путем. При этом считают, что значения  $y$ , получен-

ные в каждом опыте, определены с погрешностью  $A$  % от среднего уровня  $\bar{y}_i$ , полученного в результате проведенных 15 опытов при заполнении таблицы ОЦКП. Рассматривая  $\Delta = (A \bar{y}_i)/100$  как доверительный интервал, соответствующий 95 %-й доверительной вероятности, находят среднеквадратичное отклонение  $S_y = \Delta/t_{ct}$ , где  $t_{ct} = 1,96$  – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы равном бесконечности. Тогда  $S_y^2 = (\Delta/t_{ct})^2$ .

Дисперсии коэффициентов регрессии при использовании ОЦКП равны между собой и вычисляются по формуле:

$$S^2\{b_i\} = S_y^2 / 15.$$

Оценка значимости коэффициентов  $b_i$  производится по формуле:

$$|b_i| > t_{ct} S\{b_i\}.$$

В случае выполнения неравенства коэффициент  $b_i$  считается значимым, в случае невыполнения коэффициент  $b_i$  – незначимым и отбрасывается [13].

Примем погрешность  $A = 5$  %, тогда:  $\bar{y}_i = 3,0$ ;  $\Delta = 0,15$ ;  $S_y^2 = 0,0056$ ;  $S\{b_i\} = 0,061$ ; коэффициенты  $b_3, b_{33}, b_{13}, b_{23}$  можно считать незначимыми.

После оценки значимости коэффициентов  $b_i$  необходимо произвести оценку адекватности регрессионной модели. В том случае, когда данные для построения модели получены на основе вычислительных экспериментов, адекватность модели рекомендуется проверять не по стандартной процедуре при помощи критерия Фишера, а при помощи метода допускового контроля [12, 14]. Модель признается адекватной, если абсолютная величина разности между результатами компьютерных экспериментов и результатами, полученными в результате расчетов по модели

во всех опытных точках  $i = 1, 2, \dots, n$  не превышает некоторого допуска  $\delta$ , то есть имеет место соотношение  $|y_i - \hat{y}_i| \leq \delta$ , где  $y_i$  – определенное из опыта значение выходной величины;  $\hat{y}_i$  – рассчитанное по полиному значению выходной величины [13, 14].

Проведенные вычисления показали, что  $|y_i - \hat{y}_i| \leq 5\%$  ( $\delta = 5\%$ ) в случае если все коэффициенты  $b_i$  считаются значимыми,

$|y_i - \hat{y}_i| \leq 8\%$  ( $\delta = 8\%$ ), если  $b_3, b_{33}, b_{13}, b_{23}$  считать незначимыми.

Проведем анализ полученной зависимости для случая, когда  $b_3, b_{33}, b_{13}, b_{23}$  считаются незначимыми, то есть влияние такого фактора, как длина шага LS на амплитуду колебаний корпуса робота по углу тангажа не учитывается. График для этого случая приведен на рис. 6.

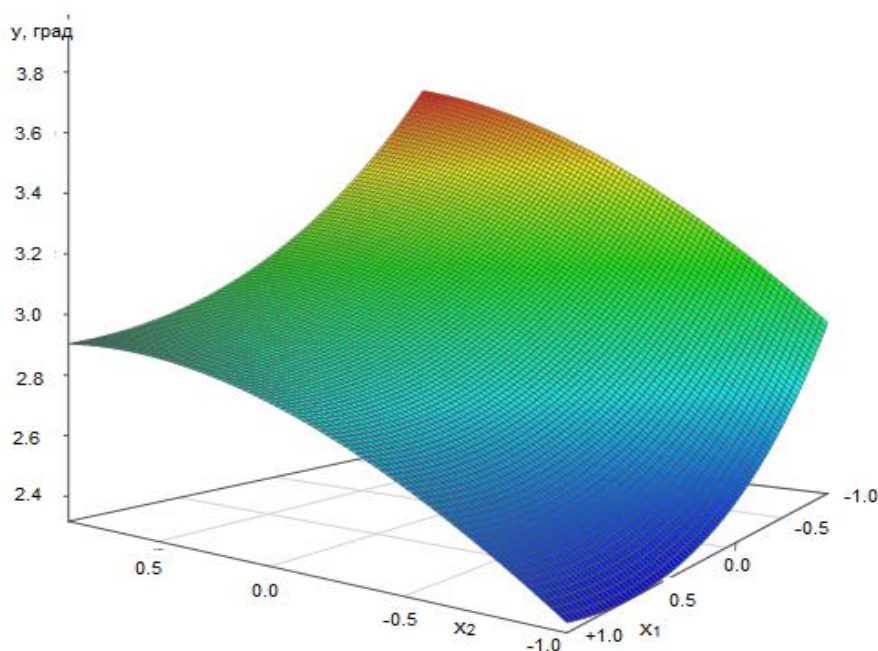


Рис. 6. График функции  $y = 2,97 + 0,4 x_1 - 0,43 x_2 - 0,156 x_1^2 + 0,231 x_2^2 - 0,1218 x_1 x_2$   
Примечание: составлено авторами.

Амплитуда колебаний по углу крена монотонно убывает при уменьшении высоты шага  $x_2$  и увеличении времени подшага  $x_1$  в установленном диапазоне изменения  $x_2$  и  $x_1$ .

Минимум зависимости найден при помощи функции `fminsearch`, использующей метод прямого поиска Нелдера – Мида среды Matlab. Получены следующие значения:  $y_{\min} = 2,3$  град при  $x_1 = 0,656$ ,  $x_2 = -1,0$ .

После перевода полученных кодированных значений  $x_1$  и  $x_2$  к натуральным  $\tilde{x}_1$  и  $\tilde{x}_2$  по формулам обратного перехода [12] получены значения:  $\tilde{x}_1 = 331$  мс,  $\tilde{x}_2 = 0,02$  м.

По приведенной методике получено уравнение регрессионной модели и для амплитуды колебаний по углу тангажа, проведена

оценка значимости коэффициентов и адекватности модели. Минимальное значение амплитуды колебаний составило  $y_{\min} = 1,2$  град при времени подшага  $\tilde{x}_1 = 352$  мс и высоте подъема ноги  $\tilde{x}_2 = 0,02$  м.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинством регрессионных моделей является наличие хорошо разработанных экономичных алгоритмов их построения с использованием методов планирования эксперимента и возможность последующего анализа поверхности отклика изучаемой функции и ее оптимизации. При этом важным является вопрос об адекватности модели. В работе регрессионная модель построена по данным, полученным

в результате проведения вычислительных экспериментов с моделью робота в среде симулятора Gazebo, оценка погрешности методом допускowego контроля показала, что погрешность регрессионной модели составляет менее 8 %.

Полученные результаты анализа поверхности отклика полученных моделей и их минимизация вполне очевидны. Амплитуда колебаний корпуса робота по углам крена и тангажа минимальна при минимальной высоте шага. Зависимость же амплитуды от времени подшага имеет минимум, который и опре-

делен. Полученные числовые данные позволяют на первых этапах разработки робота получить представление о таком важном параметре, как амплитуда колебаний корпуса робота при передвижении: при подъеме стопы на 2 см и за время 1/3 с амплитуда колебаний по углу тангажа составила менее 1,5 градусов.

По мнению авторов, рассматриваемый метод возможно применить при оптимизации параметров системы управления и по другим критериям, например, критерию минимизации расходуемой энергии.

#### Список источников

1. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 563–578. DOI 10/15787/mau.19.563-578.
2. Пикалев Я. С. Анализ существующих симуляторов робототехнических систем // Проблемы искусственного интеллекта. 2017. № 1 (4). С. 51–65.
3. Самарин В. А., Лавров А. А., Динамическое моделирование робототехнических систем в программном пакете GAZEBO // Информатика и кибернетика (ComCon-2016). СПб. : Изд-во СПбПУ, 2016. С. 56–58.
4. Васильянов Г. С., Лавров А. А., Разработка и исследование алгоритмов адаптивного управления четырехногими роботизированными платформами // Экстремальная робототехника. 2015. № 1. С. 323–332.
5. Choi H.-Y., Park J., Lee J. Quality Engineering Optimization of Robot Casting Considering Design Robustness: Comparison with Reliability // Int J Precis Eng Manuf. 2013. Vol 14, Is. 12. P. 2157–2163. DOI 10.1007/s12541-013-0292-7.
6. Zare S., Karimi-Nasab S., Jalalifar H. Analysis and Determination of the Behavioral Mechanism of Rock Bridges Using Experimental and Numerical Modeling of Non-Persistent Rock Joints // Int J Rock Mech Min Sci. 2021. Vol. 141. P. 104714.
7. Николаев Н. Н. Основы научных исследований на транспорте, планирование экспериментов и инженерных наблюдений. Зерноград : ФГОУ ВПО АЧГАА, 2007. 37 с.
8. Sun J., Zhang W., Dong X. Natural Frequency Prediction Method for 6R Machining Industrial Robot // Appl Sci. 2020. Vol. 10, Is. 22. P. 8138. DOI 10.3390/app10228138.
9. Завьялов В. М., Шпакова Л. Г., Шпаков М. А. Параметрическая оптимизация автоматизированного электропривода звена робота-манипулятора // Тр. Караганд. технич. ун-та. 2020. № 3 (80). С. 143–147.

#### References

1. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Situational Approach in the Problems of Automation Control by Technical Objects // Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie. 2018. Vol. 19, No. 9. P. 563–578. DOI 10/15787/mau.19.563-578. (In Russian).
2. Pikalev Ya. S. Analysis of Existing Simulators for Robotic Systems // Problems of Artificial Intelligence. 2017. No. 1 (4). P. 51–65. (In Russian).
3. Samarin V. A., Lavrov A. A. Dinamicheskoe modelirovanie robototekhnicheskikh sistem v programnom pakete GAZEBO // Informatika i kibernetika (ComCon-2016). St. Petersburg : Publishing House Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2016. P. 56–58. (In Russian).
4. Vasilyanov G. S., Lavrov A. A. Development and Research of Algorithms of Adaptive Management of the Quadruped Robotized Platforms // Extreme Robotics. 2015. No. 1. P. 323–332. (In Russian).
5. Choi H.-Y., Park J., Lee J. Quality Engineering Optimization of Robot Casting Considering Design Robustness: Comparison with Reliability // Int J Precis Eng Manuf. 2013. Vol 14, Is. 12. P. 2157–2163. DOI 10.1007/s12541-013-0292-7.
6. Zare S., Karimi-Nasab S., Jalalifar H. Analysis and Determination of the Behavioral Mechanism of Rock Bridges Using Experimental and Numerical Modeling of Non-Persistent Rock Joints // Int J Rock Mech Min Sci. 2021. Vol. 141. P. 104714.
7. Nikolaev N. N. Osnovy nauchnykh issledovaniy na transporte, planirovanie eksperimentov i inzhenernykh nabludeni. Zernograd : FGOU VPO AChGAA, 2007. 37 p. (In Russian).
8. Sun J., Zhang W., Dong X. Natural Frequency Prediction Method for 6R Machining Industrial Robot // Appl Sci. 2020. Vol. 10, Is. 22. P. 8138. DOI 10.3390/app10228138.
9. Zavyalov V. M., Shpakova L. G., Shpakov M. A. Parametricheskaja optimizatsiia avtomatizirovanogo elektroprivoda zvena robota-manipuliatora // Tr. Karagand. tekhnich. un-ta. 2020. No. 3 (80). P. 143–147. (In Russian).

10. Capelli B., Sabattini L. Human-Friendly Multi-Robot Systems: Legibility Analysis // Proceedings of the Human-Friendly Robotics, October 24–25, 2019, Reggio Emilia, Italy. 2020. P. 15–28.
11. Шеперд Г. М. Нейробиология. М. : Мир, 1987. Т. 2. 368 с.
12. Ивоботенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П. Планирование эксперимента в электромеханике. М. : Энергия, 1975. 185 с.
13. Электронная библиотека. Ортогональные центральные композиционные планы. URL: <https://libraryno.ru> (дата обращения: 10.11.2022).
14. Егоров А. Е., Азаров Г. Н., Коваль А. В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / под ред. В. Г. Воронова. Харьков : Вища школа, 1986. 240 с.
10. Capelli B., Sabattini L. Human-Friendly Multi-Robot Systems: Legibility Analysis // Proceedings of the Human-Friendly Robotics, October 24–25, 2019, Reggio Emilia, Italy. 2020. P. 15–28.
11. Shepherd G. M. Neurobiology. Moscow : Mir, 1987. Vol. 2. 368 p. (In Russian).
12. Ivobotenko B. A., Ilyinsky N. F., Kopylov I. P. Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike. Moscow : Energiia, 1975. 185 p. (In Russian).
13. Elektronnaia biblioteka. Ortogonalnye tsentralnye kompozitsionnye plany. URL: <https://libraryno.ru> (accessed: 10.11.2022). (In Russian).
14. Egorov A. E., Azarov G. N., Koval A. V. Issledovanie ustroystv i sistem avtomatiki metodom planirovaniia eksperimenta / Ed. V. G. Voronov. Kharkov : Vishcha shkola, 1986. 240 p. (In Russian).

#### **Информация об авторах**

**Г. С. Васильянов** – ассистент, ведущий инженер научной лаборатории.

**А. А. Лавров** – кандидат технических наук, доцент.

**А. В. Лупин** – старший преподаватель.

**И. А. Малышев** – старший преподаватель.

#### **Information about the authors**

**G. S. Vasilyanov** – Assistant Professor, Leading Engineer of the Scientific Laboratory.

**A. A. Lavrov** – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.

**A. V. Lupin** – Senior Lecturer.

**I. A. Malyshev** – Senior Lecturer.