



## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ К ДИНАМИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ

**А. Ю. Меркулова, С. А. Назаревич**

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*В данной статье рассмотрены основные критерии, влияющие на устойчивость роботов к внешним изменениям, также описаны риски, оказывающие результирующее воздействие на снижение точности автономного прохождения роботом по узкой линии, проведена оценка прогнозируемости результата прохождения трассы при заданных условиях на основе марковских цепей и выдвинуты предложения по повышению результативности прохождения различных траекторий.*

*Ключевые слова: автономный робот, следование по узкой линии, марковские цепи, SWOT-анализ, FMEA-анализ, GAP-анализ.*

### **Для цитирования:**

*Меркулова, А. Ю. Оценка устойчивости автономных роботов к динамическим изменениям окружающей среды с использованием марковских цепей / А. Ю. Меркулова, С. А. Назаревич // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 5(43). – с. 12-19. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-5-12-19.*

## ASSESSING THE STABILITY OF AUTONOMOUS ROBOTS TO DYNAMIC ENVIRONMENTAL CHANGES USING MARKOV CHAINS

**A. Y. Merkulova, S. A. Nazarevich**

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

*This article examines the main criteria that influence the resistance of robots to external changes, also describes the risks that have a resulting impact on reducing the accuracy of autonomous robot passage along a narrow line, assesses the predictability of the result of passing the route under given conditions based on Markov chains, and puts forward proposals to improve the effectiveness of passing various trajectories.*

*Keywords: autonomous robot, narrow line following, Markov chains, SWOT analysis, FMEA analysis, GAP analysis.*

### **For citation:**

*Merkulova, A. Y. Assessing the stability of autonomous robots to dynamic environmental changes using markov chains / A. Y. Merkulova, S. A. Nazarevich // System analysis and logistics. – 2024. – № 5(43). – p. 12-19. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-5-12-19.*

### **Введение**

Высокая степень автономии роботов является важным критерием в различных областях промышленности. Поэтому к развитию автономной робототехники сейчас приковано особое внимание. Одним из направлений по развитию данного направления являются соревнования «Следование по узкой линии», в рамках которых роботы должны пройти трассу от места старта до места финиша за минимальное время так, чтобы проекция робота в любой момент времени находилась на линии. Траектория движения включает в себя различные повороты и перекрестки, расположение которых на каждом соревновании отличается, так же, как и условия площадки проведения. Подготовка к таким соревнованиям заключается в проектировании и разработке робота и программировании его, однако даже самая тщательная подготовка не исключает возникновение стохастических рисков, нивелирование которых зачастую является трудновыполнимой задачей.

### **Основные положения**

Автономные роботы для следования по узкой линии имеют как свои преимущества, так и недостатки. Для оценки настоящих и прогнозируемых сильных и слабых сторон проведен



SWOT-анализ продукта. В таблице 1 представлены сильные, слабые стороны, возможности и угрозы.

Таблица 1 – SWOT-анализ продукта

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> <li>Автономность движения</li> <li>Высокая скорость прохождения траектории</li> <li>Высокая маневренность на сложных участках</li> <li>Обучаемость к разным траекториям</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>На разработку и тестирование необходимо много времени</li> <li>Низкие прочностные характеристики деталей робота</li> <li>Низкий уровень адаптации к непредвиденным обстоятельствам</li> </ul>
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> <li>Широкий спектр применения</li> <li>Развитие сенсорных технологий</li> <li>Рост интереса к робототехнике</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Недостаток квалифицированных специалистов</li> <li>Непредсказуемость поведения в нестандартных ситуациях</li> <li>Конкуренция с другими технологиями</li> </ul>

Для определения общей значимости сильных и слабых сторон, угроз и возможностей проведена количественная попарная оценка по 5-бальной шкале, где 5 – наибольшая значимость факторов, 1 – наименьшая значимость факторов (таблица 2).

Таблица 2 – Количественная оценка сильных и слабых сторон, угроз и возможностей

Критерий оценки	Возможности			Угрозы			Сумма	
	Широкий спектр применения	Развитие сенсорных технологий	Рост интереса к робототехнике	Недостаток квалифицированных специалистов	Непредсказуемость поведения в нестандартных ситуациях	Конкуренция с другими технологиями		
Сильные стороны	Автономность движения	5	4	5	4	4	3	25
	Высокая скорость прохождения траектории	5	5	4	1	2	2	19
	Высокая маневренность на сложных участках	5	5	4	3	3	4	24
	Обучаемость к разным траекториям	5	5	5	5	3	2	25
Слабые стороны	На разработку и тестирование необходимо много времени	3	4	3	5	4	5	24
	Низкие прочностные характеристики деталей робота	3	5	3	5	5	5	26
	Низкий уровень адаптации к непредвиденным обстоятельствам	3	5	3	5	5	5	26
Сумма	31	33	27	28	26	26		



Анализ позволяет понять, насколько существенными являются сильные стороны и слабыми слабые стороны, а также насколько важными являются угрозы и возможности внешней среды. Среди возможностей явно выделяются широкий спектр применения и развитие сенсорных технологий, наиболее значимые сильные стороны – это автономность движения робота и возможность обучения к прохождению разных траекторий. Существенной угрозой является недостаток квалифицированных специалистов, а наиболее слабыми сторонами оказались низкие прочностные характеристики деталей робота и низкий уровень адаптации к непредвиденным обстоятельствам.

Особое влияние на успешность прохождения роботом соревновательной трассы как раз является возможность адаптации к непредвиденным обстоятельствам. Для оценки влияния данного фактора на результат проведем оценку по заданными условиями:

1. На прохождение трассы дается 3 попытки [2];
2. В помещении имеется естественное и искусственное освещение;
3. Соревновательное полотно сделано из светоотражающего материала;
4. На прохождение трассы дается 40 секунд;
5. Попытка заканчивается дисквалификацией при невыполнении требований.

Требования дисквалификации: если робот действует не автономно, во время прохождения трассы участник команды коснулся робота, робот сошел с трассы (никакая часть робота или его проекции не находятся на линии), робот загрязняет и/или повреждает трассу, участник умышленно затягивает старт.

Расчет оптимального количества попыток для успешного прохождения автономным роботом по узкой линии проведем с помощью марковских цепей [1]. Выделим возможные состояния после очередной попытки: робот полностью прошел трассу, закончилось время на прохождение трассы, робот дисквалифицирован. Определим вероятности перехода из одного состояния в другое на основе результатов 21 эксперимента – при участии 7 роботов (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты прохождения траектории

Робот	Попытка 1	Попытка 2	Попытка 3
1	Робот прошел трассу	Робот прошел трассу	Робот прошел трассу
2	Робот дисквалифицирован	Закончилось время	Закончилось время
3	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован
4	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован
5	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован
6	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован
7	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован	Робот дисквалифицирован

Эксперимент позволяет идентифицировать следующие переходы: робот прошел трассу – робот прошел трассу, робот дисквалифицирован – робот дисквалифицирован, робот дисквалифицирован – закончилось время, закончилось время – закончилось время.

С целью определения возможности повторения результата в следующей попытке или перехода в другое состояние рассчитаем вероятности по формуле:



$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum N_{ij}}$$

где  $i$  – текущее состояние,  $j$  – состояние в следующей попытке,  $n$  – количество переходов из текущего состояния в конкретное состояние в следующей попытке,  $N_{ij}$  – количество переходов в состояние 1, 2 и 3.

При результате равно нулю считается, что переход из состояния  $i$  в состояние  $j$  невозможен. В таблице 4 представлены результаты расчета вероятностей для 3 состояний, где состояние 1 – трасса пройдена, состояние 2 – закончилось время, состояние 3 – робот дисквалифицирован.

Таблица 4 – Результаты вычисления вероятностей

Попытки	Состояние 1	Состояние 2	Состояние 3
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0,09	0,91

Визуализируем состояния системы с помощью ориентированного графа. Нумерация вершин графа означает порядковый номер состояния цепи, ребра интерпретируют возможные переходы, а цифры вероятности перехода из таблицы 2 (рисунок 1).

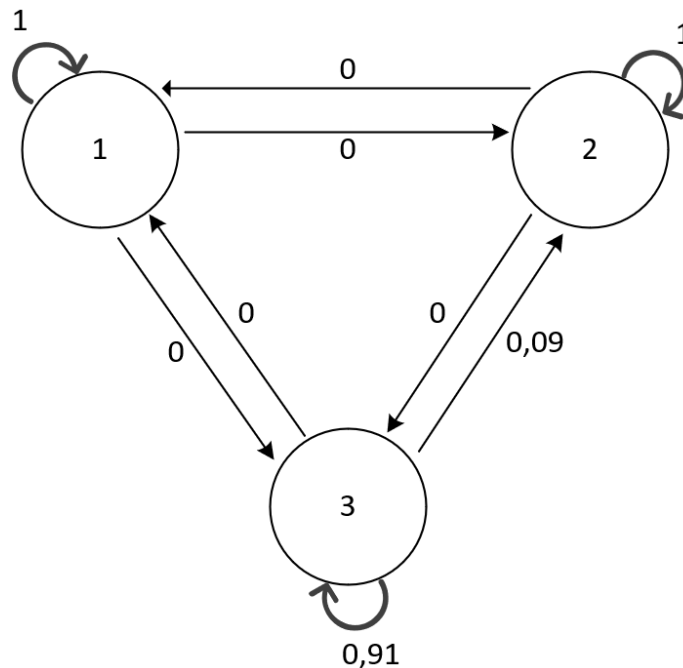


Рис. 1. Графическое представление цепи Маркова

Для выполнения последующих расчетов зададим марковскую цепь в виде матрицы переходов размером  $3 \times 3$  [3]:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,09 & 0,91 \end{bmatrix}$$

В нулевой момент времени система может находиться в любом из трех состояний, для



определения вероятности этих состояний воспользуемся формулой:

$$p_{0i} = \frac{n_i}{N}$$

где  $n_i$  – число  $i$ -х состояний эксперимента,  $N$  – общее количество экспериментов

Вектор нулевого состояния имеет вид [4]:

$$p_0 = (0,14;0,1;0,76)$$

С учетом вероятностями начального состояния можно смоделировать процесс перехода между состояниями и рассчитать количество необходимых попыток для прохождения трассы. Вектор состояния рассчитывается по формуле:

$$p_i = p_0 \times P$$

Проведем расчеты для 3 соревновательных попыток. Для первой попытки:

$$p_1 = (0,14;0,1;0,76) \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,09 & 0,91 \end{bmatrix} = (0,14;0,17;0,69)$$

Соответственно с вероятностью 69% робот будет дисквалифицирован. Рассчитаем вероятности для 2 попытки.

$$p_2 = (0,14;0,17;0,69) \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,09 & 0,91 \end{bmatrix} = (0,14;0,23;0,63)$$

После 2 попытки робот с вероятностью 63% также будет дисквалифицирован. Для 3 попытки:

$$p_3 = (0,14;0,23;0,63) \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,09 & 0,91 \end{bmatrix} = (0,14;0,29;0,57)$$

Следовательно, при данных условиях с увеличением количества попыток вероятность дисквалификации робота будет снижаться, однако она все равно будет превалировать, увеличивая шансы только на то, что робот не нарушит правила, но не успеет пройти трассу за указанное время. Вероятность прохождения трассы меняться не будет, соответственно в данном случае прохождение трассы возможно только при прохождении ее в нулевом состоянии.

В данном примере роботы оказались уязвимы к возникшим стохастическим рискам, и они не будут способны к ним адаптироваться. Для выявления наиболее проблемных областей проведем GAP-анализ, в котором 6 выделенных критериев оценены по шкале от 1 до 5, где 1 – низкий уровень, 5 – высокий уровень (рисунок 2) [5].

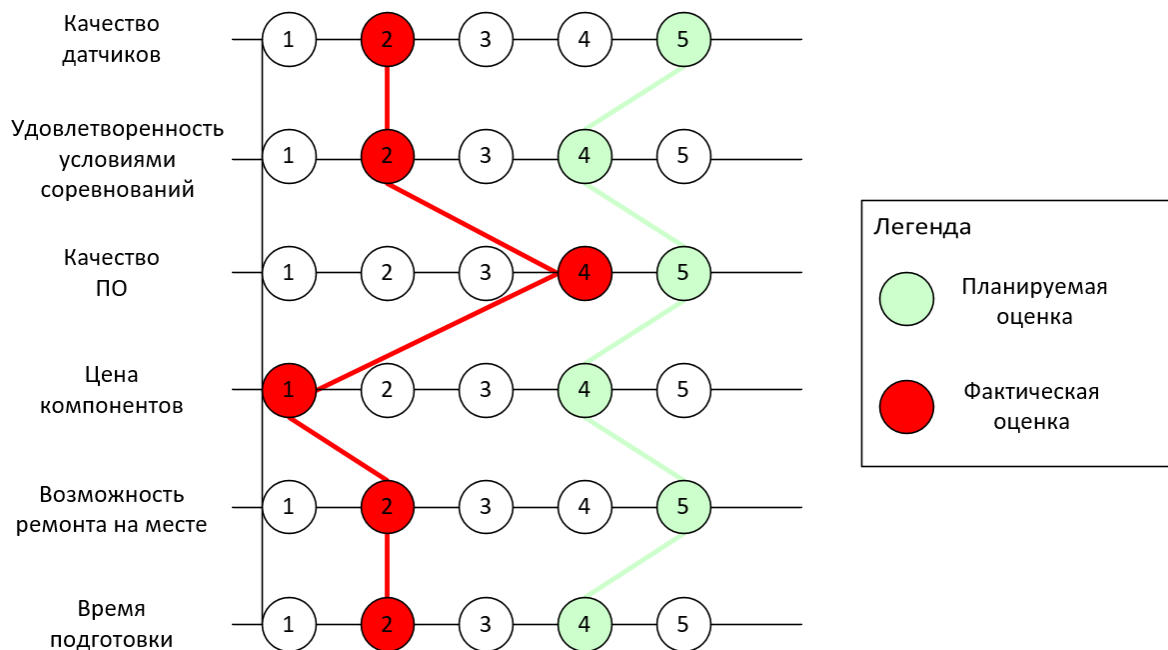


Рис. 2. GAP-анализ

В связи с тем, что времени на подготовку было меньше, чем требовалось для тщательной подготовки, а компоненты покупались по более низкой цене, качество датчиков оказалось не высоким. Наибольшее влияние на возникновение проблем в дни соревнований оказывают качество компонентов, условия соревнований и ограничения по ремонту на месте.

С помощью FMEA-анализа оценим влияние потенциальных причин непрохождения трассы роботом и выявим наиболее существенные из них (таблица 5).

Таблица 5 – FMEA-анализ

Процесс	Потенциальное несоответствие	Последствия	S	Потенциальная причина	O	Меры по предотвращению	Меры по обнаружению	D	ПЧР
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Следование по узкой линии	Поломка датчиков	Сход с трассы	10	Заводской брак/поломка при транспортировке в багаже самолета	6	Аккуратная транспортировка	Проверка на распознавание линии	3	180
	Высокая светоотражающая способность линии	Невозможность старта	7	Использование глянцевого материала для трассы	6	Использование матового покрытия	Визуальная оценка	1	42
	Совмещение искусственного и естественного света на площадке	Невозможность старта	6	Условия площадки проведения соревнований	8	Настройка освещения под особенности компетенции	Визуальная оценка	1	48
	Ошибки в программном обеспечении робота	Сход с трассы	4	Невнимательность программиста	7	Контроль	В ходе испытаний	7	198
	Физическая неисправность конструкции	Сход с трассы	8	Столкновение с окружающими объектами	4	Своевременная остановка робота	В ходе испытаний	2	64



Результаты FMEA-анализа представлены на диаграмме (рисунок 3).

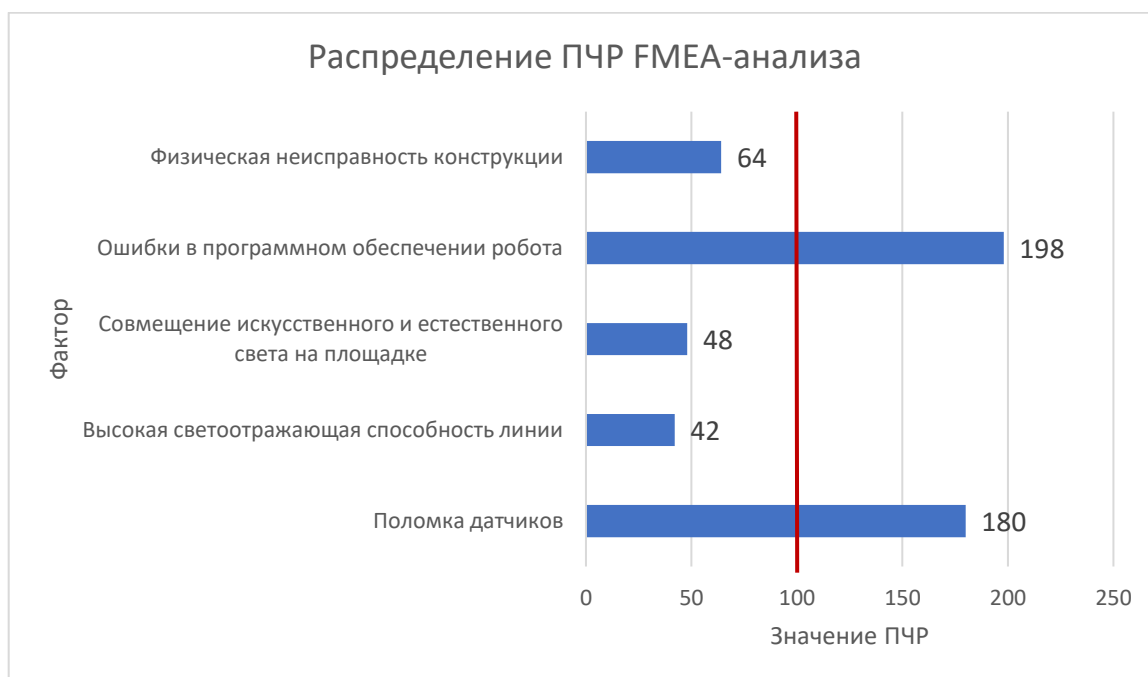


Рис. 3. Диаграмма распределения ПЧР факторов

Значимыми факторами являются те, значения предельного числа риска которых превышают 100, соответственно из данных FMEA-анализа можно сделать вывод о том, что наиболее существенным факторами оказывающие воздействие на возникновение проблем в автономном следовании робота по узкой линии являются ошибки в программном обеспечении и поломка датчиков.

### Заключение

Концепция автономных роботов для следования по узкой линии имеет существенные преимущества для дальнейшего развития и масштабирования. Проведенный анализ показал, что прогнозировать результат с помощью такого инструмента как марковские цепи весьма проблематично из-за возможного появления различных незапланированных рисков, адаптироваться к которым на месте невозможно либо из-за условий, в которых проводятся соревнования, либо из-за возникновения критических неисправностей в аппаратной части робота. Для снижения влияния внешних факторов стоит особое внимание уделять самой конструкции робота и проводить тестирования в различных условиях для своевременного выявления и устранения недостатков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вилсов В. Я.* Применение марковских цепей для моделирования и прогнозирования развития пожара / *В. Я. Вилсов* // Инженерный вестник Дона. – 2021. – №3. – 11 с.
2. Регламент соревнования по дисциплине: Следование по узкой линии экстремал. – Минск, 2024. – 5 с.
3. *Зорин А. В.* Федоткин Введение в общие цепи Маркова. М.А.: Учебно-методическое пособие / *А. В. Зорин, В. А. Зорин, Е. В. Пройдакова* – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 51 с.
4. *Назаревич С. А.* Марковские цепи для решения проблем управления технологическим процессом в производственной системе / *С. А. Назаревич, А. Ю. Меркулова* // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 1(35). – С. 67-73.



5. *Власюк, Т. А.* Применение GAP-анализа для оценки качества информационного обеспечения пассажиров на железнодорожных вокзалах / Т. А. Власюк, А. Н. Белоус // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2021. – № 1(3). – С. 63-67.

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Меркулова Анастасия Юрьевна**

Студент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А

E-mail: merkulova-amail@mail.ru

**Назаревич Станислав Анатольевич**

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А

E-mail: albus87@inbox.ru

### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Merkulova Anastasia Yurievna**

Student

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: merkulova-amail@mail.ru

**Nazarevich Stanislav Anatolievich**

Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: albus87@inbox.ru