

Разработка системы управления в REPEAT для реализации S-образного движения робота-змеи

А.О. Страхова, С.Н. Виниченко

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва

Аннотация: В статье рассмотрена робототехническая система управления для реализации S-образного движения робота-змеи, и проведена оценка особенности ее использования на физическом прототипе. Так как робот-змея представляет собой сложную составную структуру, то оценка и задание определенного типа передвижения становится одной из первостепенных задач при разработке данной системы управления. Имитационная модель робота-змеи реализована при помощи математического моделирования в отечественном программном обеспечении REPEAT. В результате проведенного моделирования установлено, что разработанная система управления обеспечивает работоспособность робототехнической системы, обеспечивает точность перемещения и адаптивность к изменяющимся внешним условиям.

Ключевые слова: математическое моделирование, имитационная модель, REPEAT, робот-змея, система управления волнообразного движения, изменение крутящих моментов.

За последние несколько лет стремительно развивается интерес к разработке и применению робототехнических систем как в производственных условиях [1, 2] и различных исследованиях [3, 4], так и в повседневной жизни [5]. Наибольшую популярность приобретают биологические роботы, которые повторяют внешний вид и особенности поведения, движения живых существ [6, 7]. Одним из интересных направлений таких робототехнических систем являются роботы-змеи, представляющие собой гибкие механизмы, копирующие перемещение биологических змей [8, 9]. Применение данных робототехнических систем обуславливается условиями, при которых присутствие человека невозможно или нежелательно [10].

Создание эффективной системы управления движением робота-змеи относится к научно-техническим задачам, решаемым на этапе проектирования конструкции механизма [11]. Это необходимо для координации степеней свободы, адаптации к различным типам поверхностей,

построение системы энергоемкого потребления и, следовательно, обеспечении устойчивого движения робота.

Принято выделять четыре основные механики движения, и одним из самых распространенных является волнообразный или, так называемый, S-образный тип перемещения. Так, для модели робота-змеи (рис.1), включающей 16 основных звеньев, а также голову и хвост, разработана система управления, реализующая волнообразный тип движения.



Рис. 1. – 3D-модель робота-змеи

Разделив всю систему на структурные составляющие, можно выделить ключевые параметры управления. Поскольку реализуется волнообразный тип перемещения, то параметрами управления будут: скорости и ускорения для каждого из звеньев, а также крутящие моменты. В качестве управляющих сигналов, воздействующих на систему, выступают углы поворотов каждого звена относительно другого, фазы и амплитуды изгибов каждого блока.

Учитывая необходимость дальнейшей адаптации имитационной модели управления роботом-змей к различным поверхностям, система включает в себя также силы трения и инерции, выполняющие функцию обратной связи. Рассматривая каждый элемент системы управления по отдельности,

сформирована ее имитационную модель, где в качестве среды моделирования использовалось российское функциональное программное обеспечение REPEAT [12], которое представляет собой онлайн-приложение для разработки и тестирования моделей систем и процессов.

Полная модель системы управления движением робота-змеи включает 16 частей (рис.2), каждая из которых описывает работу одного звена робота.

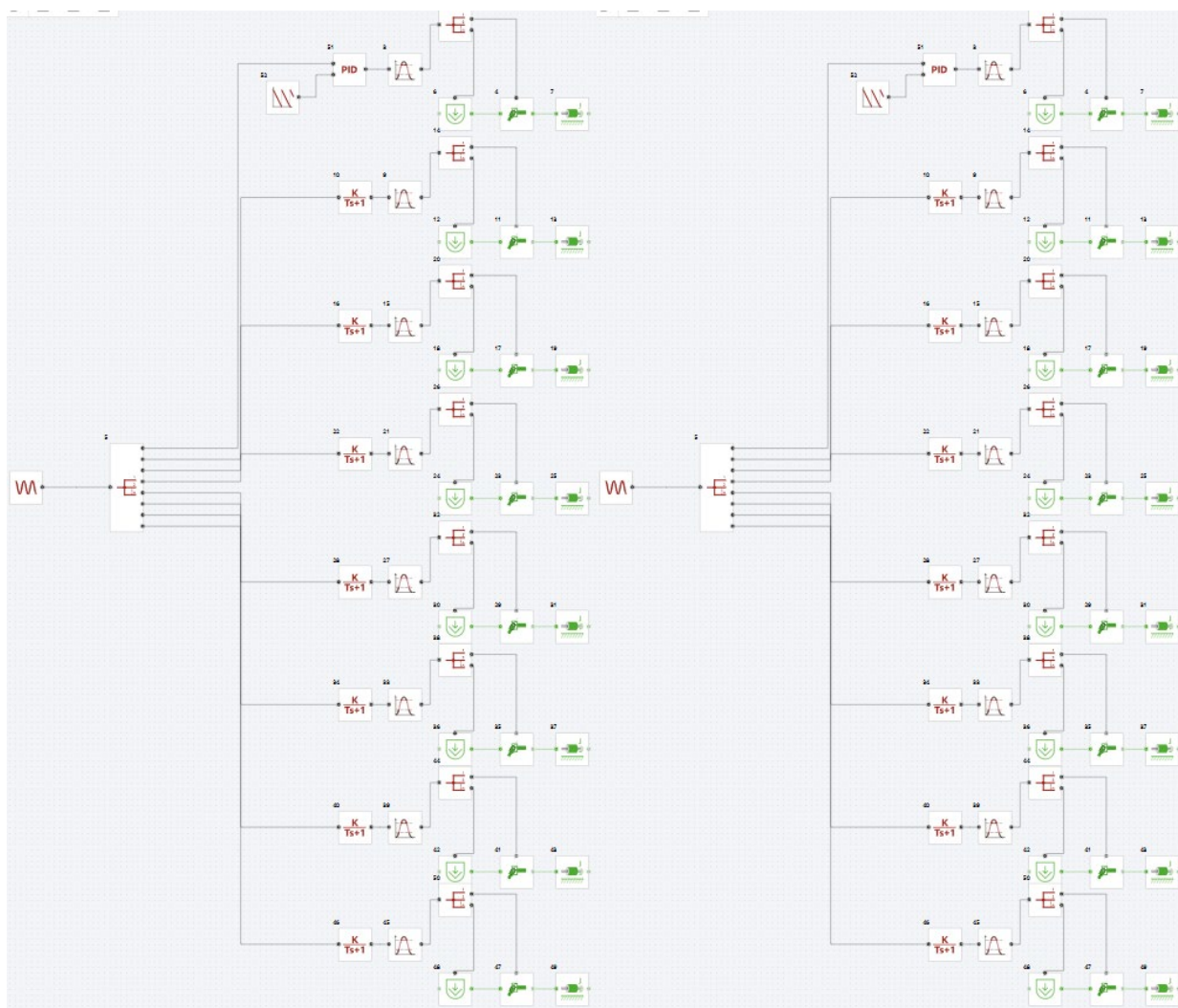


Рис. 2. – Модель системы управления движением робота-змеи

Для удобства представленная модель условно разделена на две части, в каждой из которой по 8-мь блоков, определяющих зависимость расположения осей вращения звеньев. При этом, в предложенной конструкции голова, как и

хвост, не влияют на движение, а относятся к используются для размещения внутренних компонентов, таких как управляющая плата, дополнительные модули передачи данных, камера, проводка и т.д.

До построения имитационной модели системы управления, были протестированы возможности конструкции данной 3D-модели робота [13, 14], и по результатам получен ряд параметров, которые заданы как ее граничные условия. Так, основными точками формирования волны являются звенья 5, 10 и 15, с учетом, что длины звеньев являются одинаковыми по 6 см. Максимальный угол поворота между двумя звеньями соответствует 90° , а угол поворота между звеньями при нормальных условиях 45° . Также учитываются статическое трение, которое составляет 1 Н·м и трение скольжения – 0,5 Н·м.

В процессе тестирования было отмечено, что при последовательном соединении нескольких звеньев в кинематическую цепь накладываются шумы на выходные сигнала моментов и скоростей (рис.3).

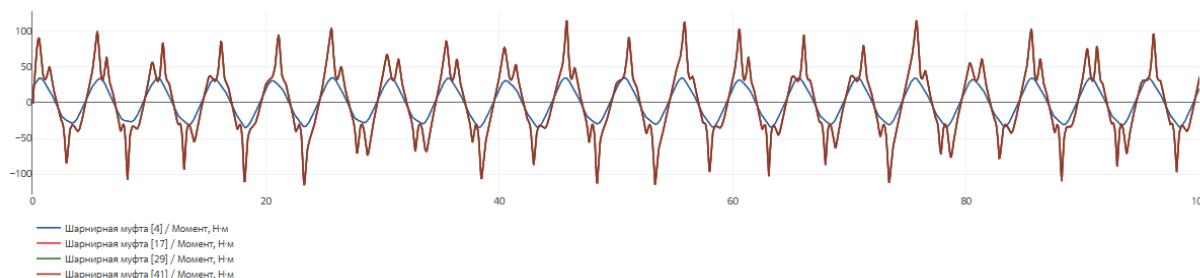


Рис. 3. – Изменение крутящих моментов при наличии шумов

Для минимизации числа шумов и их воздействия на выходные величины, применяется ПИД-регулятор в каждом из звеньев с сервомотором (рис.4), который обеспечивает точность позиционирования, а также повышает плавность и устойчивость к шумам.

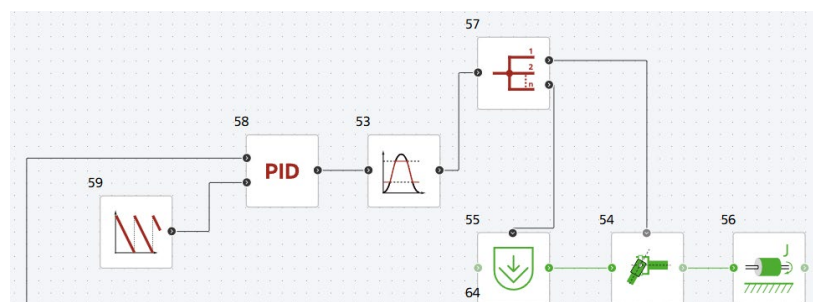


Рис. 4. – Модель одного звена робота-змеи

Оптимизируя коэффициенты регулирования, получим необходимый результат по значениям угловых скоростей и моментам вращения сервомоторов. При этом, крутящие моменты для нечетных звеньев, у которых оси вращения располагаются горизонтально поверхности перемещения робота-змеи, будут различаться (рис. 5).

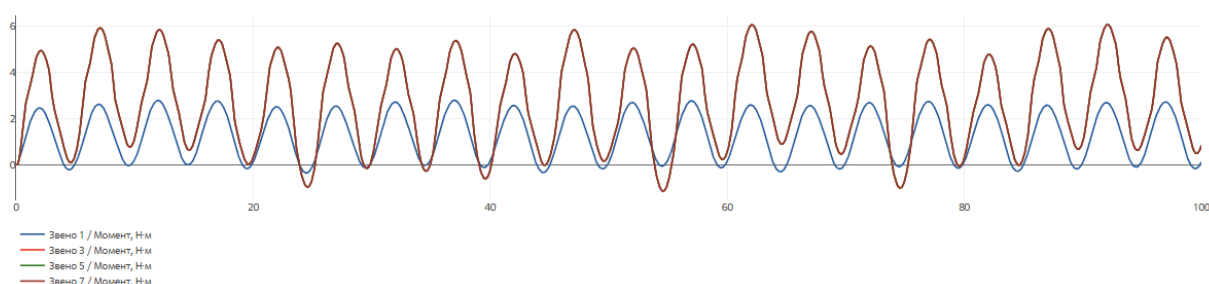


Рис. 5. – Изменение крутящих моментов с управление ПИД-регулятора

Изменение же крутящих моментов для четырех четных звеньев, оси вращения которых перпендикулярны поверхности перемещения робота будут практически идентичны (рис. 6).

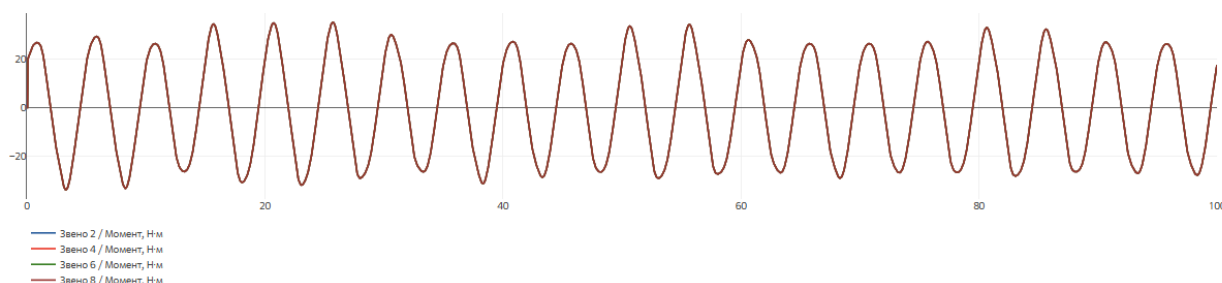
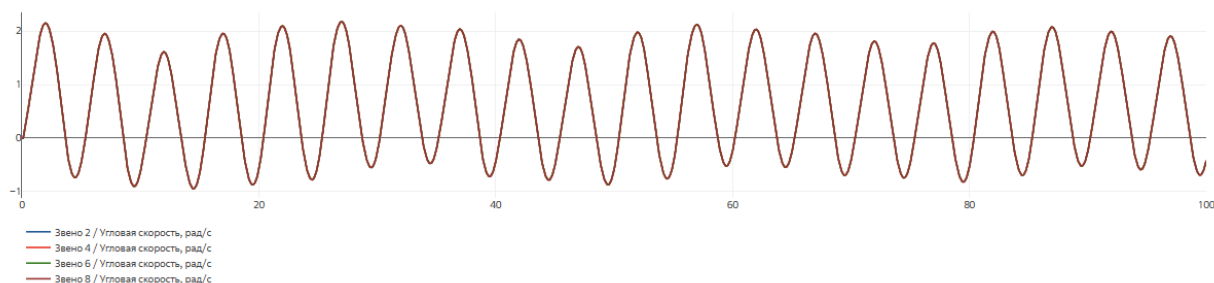
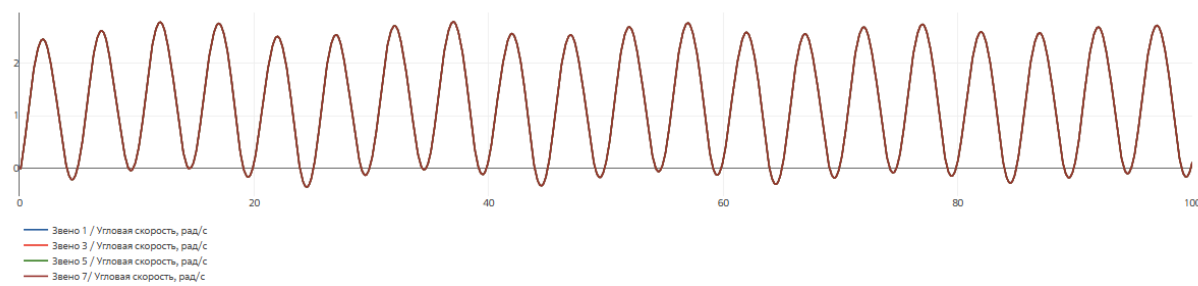


Рис. 6. – Изменение крутящих моментов четырех четных звеньев

Изменение угловых скоростей первых восьми звеньев, как четных (рис.7, а), так и нечетных (рис.7, б), в обоих случаях также имеют одинаковые значения между собой.



а)



б)

Рис. 7. – Изменение угловых скоростей: а) нечетных четырех звеньев, б) четных четырех звеньев

Для остальных восьми звеньев графики угловых скоростей и моментов аналогичны, поскольку они чередуются по одному в кинематической цепи робота-змеи.

В заключении следует отметить, что создание имитационной модели системы управления движением робота-змеи позволяет использовать при анализе не один тип движения, а несколько, реализуя таким образом гибридную систему. При этом результаты моделирования, использованные на физическом прототипе, показали, что погрешность теоретических расчетов не превышает 5%. Также данная модель, созданная в REPEAT, позволяет

проводить оптимизацию с учетом машинного обучения и адаптивного управления.

Литература

1. Кузнецов К.Д., Мещерякова А.А., Грибанов А.А. Перспективы развития робототехнических систем// Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. № 13. С. 39-42.
2. Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Третьяков П.Л. Новые идеи в робототехнике// Вестник научного общества студентов, аспирантов и молодых ученых. 2023. № 1. С. 125-131.
3. Соловьев П.Р., Савина Л.Ю., Захаркина С.В., Масанов С.В., Рыжкова Е.А. Разработка системы управления квадрокоптером в SimMechanics// Инженерный вестник Дона, 2023, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906
4. Афанасьев Р.А., Кочконян В.М., Савилов А.А. Разработка беспилотного летательного аппарата для сканирования помещений// Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. Москва, 2024. С. 4-6.
5. Романов П.С., Романова И.П. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом// Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4692
6. Хайруллина А.М., Чурилова А.А., Масанов Д.В., Виниченко С.Н. Реинжиниринг мехатронного робототехнического устройства. Разработка учебного робота-собаки// Сборник научных трудов кафедры автоматизации и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. С. 131-133.

7. Никашин А.К., Корчагин А.С. Разновидности шагающих роботов// Альманах Крым. 2023. № 37. С. 101-105.
8. David L. Hu, Jasmine Nirody, Terri Scott, Michael J. Shelly, The mechanics of slithering locomotion// Proceeding of the National Academy of Sciences (PNAS), New York. 2009. p. 5.
9. Transeth A.A., Leine R.I., Glicker C., Pettersen K.Y., Liljeback P. Snake Robot Obstacle-Aided Locomotion: Modeling, Simulations, and Experiments// IEEE Transactions of Robotics VOL.24. 2008. pp. 88-104.
10. Mariann Merz, Askel A., Transeth, Corm Johansen, Magnus Bjerkeng, Snake robots for space applications. SINTEF, Norway, 2017. 54 p.
11. Transeth A.A., Leine R.I., Glicker C., Pettersen K.Y., Liljeback P. Non-smooth 3D Modeling of Snake. Trondlheim, №7491, Norway. pp. 8.
12. Платформа модельно-ориентированной среды проектирования и математического моделирования REPEAT. URL: repeatlab.ru/
13. Страхова А.О., Григорьев А.А., Виниченко С.Н. Анализ конструктивных особенностей робота-змеи // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2025. С. 58-66.
14. Страхова А.О., Григорьев А.А., Виниченко С.Н. Расчет кинематики и динамики для робота-змеи// Материалы докладов всероссийской научно-практической конференции с международным участием им. Я.В. Мильмана. Москва, 2025. С. 136-145.

References

1. Kuznecov K.D., Meshherjakova A.A., Gribanov A.A. Mehatronika, avtomatika i robototekhnika. 2024. № 13. pp. 39-42.
-



2. Shhelkunov E.B., Vinogradov S.V., Tret'jakov P.L. Vestnik nauchnogo obshhestva studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. 2023. № 1. pp. 125-131.
3. Solov'ev P.R., Savina L.Ju., Zaharkina S.V., Masanov S.V., Ryzhkova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906
4. Afanas'ev R.A., Kochkonjan V.M., Savilov A.A. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh issledovatelej s mezhdunarodnym uchastiem. Moskva, 2024. pp. 4-6.
5. Romanov P.S., Romanova I.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4692
6. Hajrullina A.M., Churilova A.A., Masanov D.V., Vinichenko S.N. Sbornik nauchnyh trudov kafedry avtomatiki i promyshlennoj jelektroniki Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.N. Kosygina. M.: RGU im. A.N. Kosygina, 2024. pp. 131-133.
7. Nikashin A.K., Korchagin A.S. Al'manah Krym. 2023. № 37. pp. 101-105.
8. David L. Hu, Jasmine Nirody, Terri Scott, Michael J. Shelly, Proceeding of the National Academy of Sciences (PNAS), New York. 2009. p. 5.
9. Transeth A.A., Leine R.I., Glicker C., Pettersen K.Y., Liljeback P. IEEE Transactions of Robotics VOL.24. 2008. pp. 88-104.
10. Mariann Merz, Askel A., Transeth, Corm Johansen, Magnus Bjerkeng, Snake robots for space applications. SINTEF, Norway, 2017. 54 p.
11. Transeth A.A., Leine R.I., Glicker C., Pettersen K.Y., Liljeback P. Non-smooth 3D Modeling of Snake Trondheim, №7491, Norway. pp. 8.
12. Platforma model'no-orientirovannoj sredy proektirovanija i matematicheskogo modelirovanija REPEAT [Platform of model-oriented design environment and mathematical modeling REPEAT]. URL: repeatlab.ru/



13. Strahova A.O., Grigor'ev A.A., Vinichenko S.N. Sbornik nauchnyh trudov kafedry avtomatiki i promyshlennoj jelektroniki Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.N. Kosygina. M.: RGU im. A.N. Kosygina, 2025. pp. 58-66.

14. Strahova A.O., Grigor'ev A.A., Vinichenko S.N. Materialy dokladov vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem im. Ja.V. Mil'mana. Moskva, 2025. pp. 136-145.

Дата поступления: 17.07.2025

Дата публикации: 25.08.2025