

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
( Н И У « Б е л Г У » )

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК  
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЛОКОМОЦИОННЫХ МОД  
ЗМЕЕПОДОБНОГО РОБОТА**

Магистерская диссертация  
обучающегося по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
очной формы обучения, группы 07001536  
Усатого Ивана Михайловича

Научный руководитель

Рецензент

БЕЛГОРОД 2017

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>3</b>
Постановка задачи	4
1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗМЕЕПОДОБНЫХ РОБОТОВ.	5
2. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ	12
2.1 Макет исследуемого змееподобного робота	12
2.2 Тип исследуемых локомоционных мод	13
2.3 Математическое описание параметров формы змееподобного робота	14
2.4 Расчетная оценка кинематики механизма в целом выполненных в программе MSC.ADAMS.	15
3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	16
4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
5 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	27

## **Введение**

В настоящее время разработки автоматических устройств, использующие для перемещения по поверхности и в водной среде волновые движения получило востребованный характер. Востребованность таких устройств, в первую очередь, обусловлено их потенциальной адаптивностью к поверхностям и среде перемещения, а также сложной структуре окружения. В качестве перспективных прикладных задач для змееподобных роботов рассматриваются: специальные операции по выполнению поисковых работ при ликвидации последствий природных и техногенных катастроф; действия связанные с разведывательной и диверсионной деятельностью спецслужб и вооруженных сил; выполнение исследований на космических аппаратах и поверхностях планет.

В ходе разработок и конструирования змееподобных роботов возникает ряд задач различного рода. Наряду с традиционными задачами (ориентация, позиционирование, распознавание сцены, построение карты, планирование движения, телеуправляемое и автоматическое выполнение рабочих операций), для мобильных змееподобных роботов важнейшее значение имеет задача организации локомоций (походки). Моды локомоций, реализуемые многозвенными змееподобными роботами, бывают как биоморфного происхождения, так и искусственного, полученного в результате параметрического поиска на модели.

Эта работа посвящена разработке рационального подхода к синтезу конструкции змееподобного робота использующего искусственные локомоционные моды движения.

## **Постановка задачи**

Основной целью, которая ставилась перед написанием данной магистерской работы, являлась реализация оптимальной искусственной локомоционной моды бес колесного змееподобного робота.

В ходе выполнения цели работы были поставлены следующие задачи:

- Создание испытательной модели змееподобного робота в программном комплексе MSC.ADAMS
- Исследование кинематики модели змееподобного робота при формировании искусственной локомоционной моды.
- Поиск закономерностей в полученных результатах.

## 1. Обзор существующих змееподобных роботов.

На сегодняшний день в мире существует несколько видов и моделей змееподобных роботов. Все они могут быть поделены на 2 группы: это механизмы, имеющие одно и более подвижных относительно корпуса опорных колес на каждом модуле, и без колёсные механизмы, которые при перемещении по поверхности опираются непосредственно на корпус. В зависимости от числа степеней свободы шарниров и количества звеньев эти модели обладают большим или меньшим общим числом степеней свободы и способностью имитировать движения живой змеи. Замечу, что реальные динамические и физические характеристики искусственных змей существенно отличаются от характеристик природных прототипов [1] как по маневренности и грузоподъёмности, так и по скорости, степени автономности (т.е. способности к длительной работе без использования внешнего источника питания) и др.

В этой главе сделан обзор на существующие без колесные механизмы, а также обзор разработкам, которые положили начало современным этапам проектирования змееподобных автоматических устройств.

Первые разработки были реализованы в виде колесных роботов в 70-х годах прошлого века Hirose и Umetami, которые разрабатывали устройства, перемещающиеся за счёт изгибания тела. Активный хордовый механизм с колесными опорами (Active Cord Mechanism model ACM III) – это первый в мире робот использующий для движения принцип серпенойды [3,5].

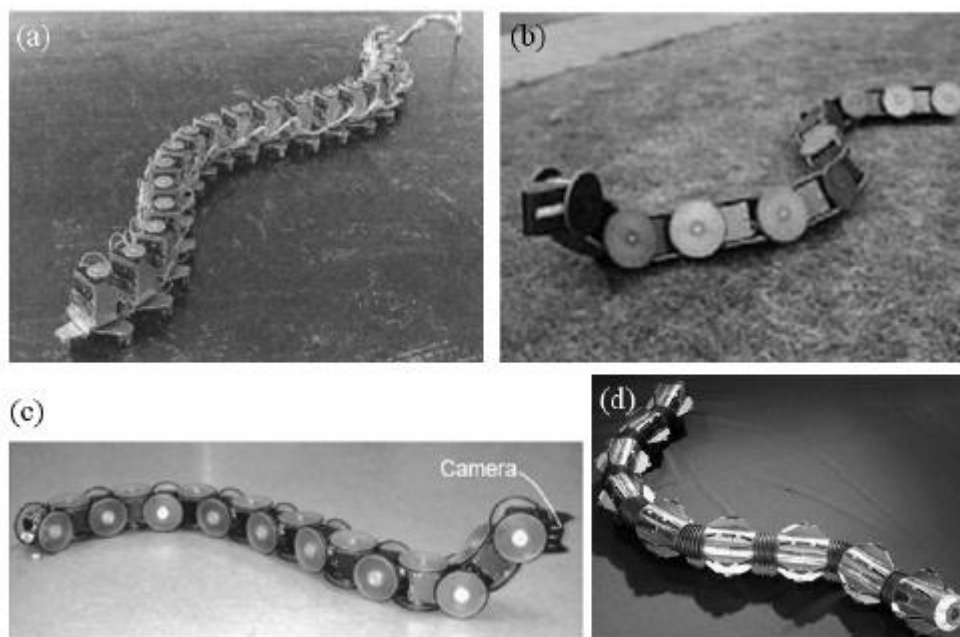


Рис. 1. Змееподобные роботы S. Hirose, использующие пассивные колёса (a) АСМ III [5], (b) АСМ-R3 [5], (c) АСМ-R3n со стабилизированной головкой [6] и (d) АСМ-R5 [7]

Его длина 2 м, он состоит из 20 сегментов – модулей опирающихся на пары пассивных колес с перпендикулярными «телу» механизма осями, имеющих возможность свободно вращаться вокруг вертикальной оси. 26 декабря 1972 года этот робот первым в мире, осуществил механическое змеевидное движение со скоростью около 40 см/сек, используя изгибные движения в горизонтальной плоскости тела. Дальнейшие разработки этой исследовательской группы привели к созданию робота АСМ-R3[5] состоящего из модулей с двумя ортогональными осями – многозвенного механизма с пассивными колесами. В 2005 г. лаборатория Hirose представила макет амфибийного робота АСМ – R5 [7]. Робот состоит из модулей, которые в свою очередь, состоят из двух частей, соединенных двухступенными универсальными шарнирами с ортогональными осями в плоскости, перпендикулярной оси симметрии модуля. Вращение вокруг осей задается сервоприводами, расположенными одному в каждой из половин, через дополнительный двухступенчатый редуктор. Вся конструкция помещена в водонепроницаемый корпус и вывешена, что обеспечивает

плавучесть, близкую к нейтральной и позволяет плавать под водой. Снаружи корпуса робот оснащен подпружиненными пассивными колесами по шесть по шесть на каждом модуле. Это позволяет роботу передвигаться не только по воде, под водой, но и по твердой поверхности в моде змеевидного движения. Робот оснащен распределительной системой управления. Каждый модуль имеет процессор, аккумуляторы и приводы и может работать автономно. Используя систему связи, каждый модуль получает команды управления от «головы» и автоматически определяет свой номер, что позволяет произвольно добавлять/убирать модули. Управление роботом реализуется путем задания относительных углов поворота шарнирных звеньев головного звена, которое с определенной задержкой передает эти значения последующим модулям в цепи.

Для описания мгновенной формы плоской кривой при некоторых локомоционных модах, достаточно хорошо совпадающей с формой змеи Hirose была предложена гармоническая зависимость угла поворота касательной к кривой от дуговой координаты. Автор назвал её серпеноида. Применение этой кривой, в настоящее время является единственным подходом, используемым при параметрическом описании формировании локомоционных мод, в том числе и искусственных.

Вторая крупнейшая лаборатория после Hirose, базируется в Питсбурге (США) при университете Карнеги Мелон (Carnegie – Mellon University, Pittsburgh, PA). Среди работ этой лаборатории хотелось бы отметить работу «Limbless Locomotion: Learning to Crawl with a Snake Robot» Kevin J. Dowling [14]. Змееподобные, безколесные роботы, разработанные в этой лаборатории биоробототехники обладают широкими локомоционными возможностями: передвижение по ровной поверхности, пересеченной местности, воде, преодоление вертикальных препятствий, движение по/в горизонтальной или вертикальной трубе, заползание в труднодоступные места. За весь период работы лаборатории было создано более 18 роботов. Конструкции роботов

основывались на разработках S. Hirose, Kevin J.Dowling, и Mark Y. [2-3, 13-16].

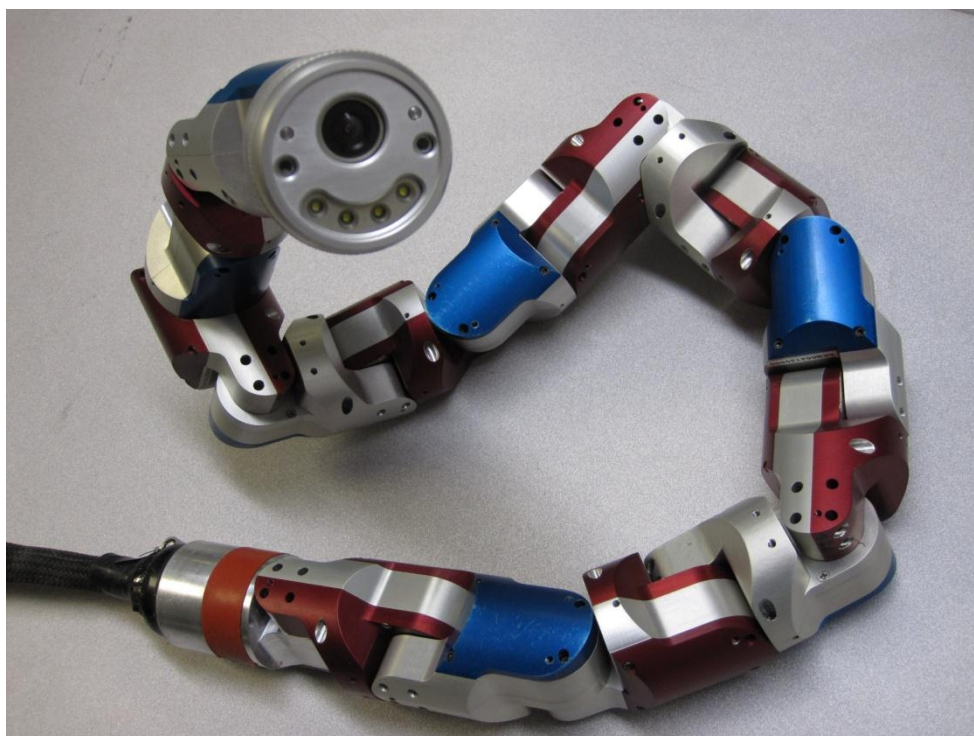


Рис. 2. Модульный змееподобный робот разработанный при университете Карнеги – Мелон (США)[16]

Отличительной особенностью этих конструкций является использование последовательно соединенных одностепенных модулей. К 2007 г. Модули стали располагать ортогонально друг другу для реализации пространственных локомоционных мод [16]. Каждый модуль состоит из стандартного сервопривода для моделирования с заменой электроники для обеспечения сервопривода большей мощности. Конструкция роботов состоит из 16 бес колесных, последовательно соединенных одностепенных модулей с ограничением вращения в 180 градусов. Для реализации движения в пространстве оси вращения любых двух соседних модулей расположены ортогонально. Управление роботом осуществляется при помощи клавиатуры или джойстика через компьютер. Подробности конструкции и устройства робота приведены в работах[17,18]



В работах Dowling и Kevin J, «Limbless Locomotion» (что в переводе с англ. «бесконечное перемещение»)[14], для задания формы змееподобного робота, для каждой из плоскостей изгиба составного корпуса робота применялась гармоническая зависимость шарнирного угла поворота от номера шарнира соответствующей ориентации. Подбор параметров серпеноид осуществлялся на виртуальной модели, исходя из некоторых критериев оптимальности движения. Затем наборы, соответствующие синтезированным модам, были использованы при реализации движения на действующем макете с такой же кинематической структурой.

В ЦНИИ РТК (Санкт - Петербург) научно-исследовательские работы ведутся с 2002 г., в области создания змееподобных роботов [20-24]. Институтом были разработаны макеты змееподобного робота «змеелок-1» и «змеелок-2». В настоящее время ведутся разработки третьего макета «змеелок-3» [22]. Робот «змеелок» представляет из себя робототехническое устройство змееподобного типа состоящую из 16 звеньев общей длиной 1 м. Звенья соединены между собой с помощью двухстепенных шарниров Гука таким образом, чтобы обеспечивались повороты вокруг вертикальной и горизонтальной оси для каждого из них [23].



Рис. 3. Макет многофункционального мобильного робота «змеелок-2»[21].

Теоретическая часть статьи содержит описание подхода к формированию искусственных локомоций при помощи модели названной «виртуальные колеса»: «Единое описание всех мод локомоций может быть выполнено с использованием понятия виртуальных колёс, образуемых при волновом движении гибкого тела. Часть мод реализуется при режиме качения гибкого тела. Часть мод реализуется при режиме качения без скольжения, часть при качении с проскальзыванием вдоль обода колеса» [22]. Так же авторами была приведена схема реализации локомоций мод змеи используя «виртуальные колёса». Попытки создания обобщенной модели для реализации локомоционных мод нельзя считать завершённой, так как модель не отвечает на ряд вопросов возникающих при конструировании змееподобного робота, к примеру: какова зависимость скорости змееподобного робота от числа подвижных модулей, зависимость скорости от «шероховатости» поверхности и т. д. То есть подбор параметров серпеноид осуществлялся на виртуальной модели, исходя из некоторых критериев оптимальности движения.

В Белгородском государственном исследовательском университете (БелГУ) при СКБ ведутся научно – исследовательские работы по созданию змееподобных роботов.

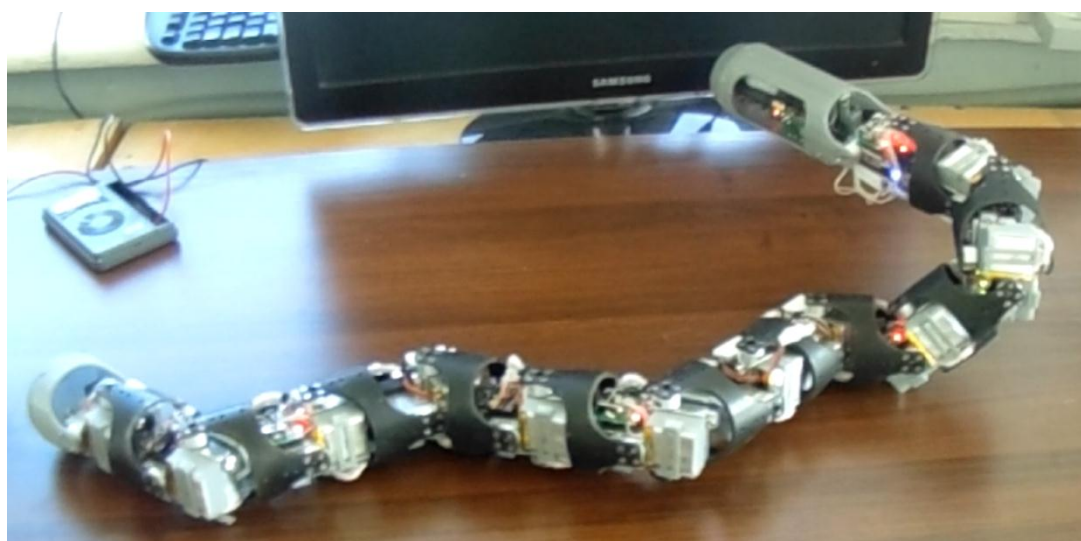


Рис. . . . . .

.....

Из обзора змееподобных роботов, следует вывод, об отсутствии рационального подхода к подбору параметров серпеноиды. Подбор параметров осуществляется из некоторых критериев оптимальности движения, затем данные наборы, соответствующие синтезированным модам, были использованы при реализации движения на действующем макете. Попытки создания общей математической модели движения, предложенная ЦНИИ «виртуальные колеса» не оправдалась, поскольку в результате применения данной модели на действующий макет змееподобного робота цифры получаются сильно приближенными (порядки). Данную модель нельзя считать общей.

## 2. Описание работы

### 2.1 Макет исследуемого змееподобного робота

В качестве действующего макета змееподобного робота, рассмотрена механическая конструкция, состоящая из 5 бесколесных модулей, соединенных одностепенными шарнирами вращения с чередующимися ортогональными осями (для реализации пространственных локомоционных мод), для каждой из плоскостей изгиба. Робот приводится в движение 10-ю сервоприводами с ограничением вращения в 180 градусов.

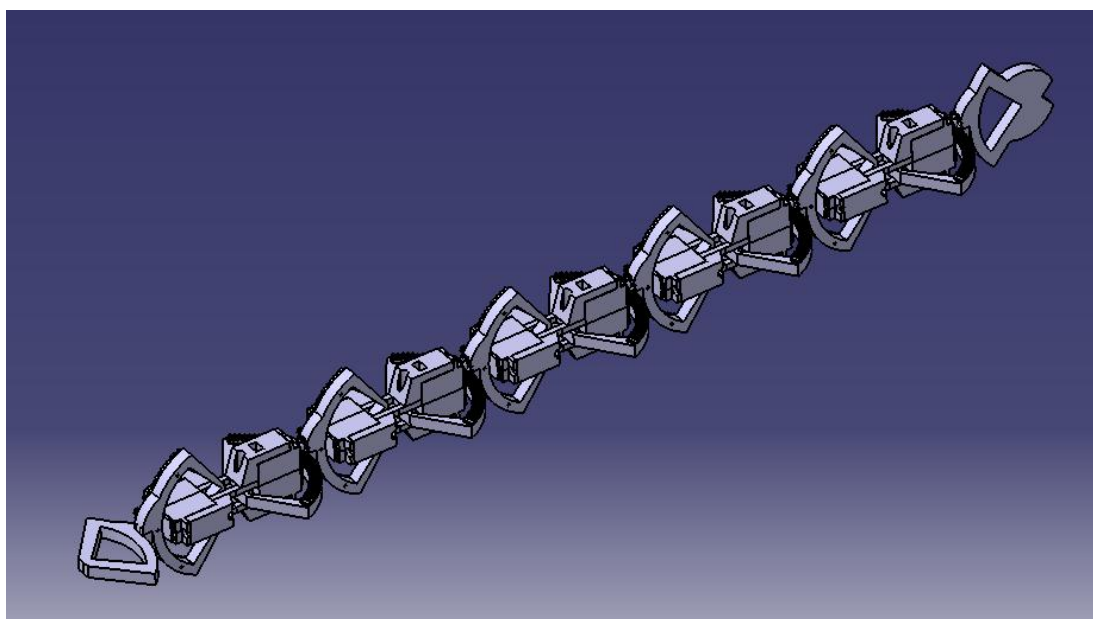


Рис.4. 3D модель змееподобного устройства.



Рис. 5. Макет змееподобного устройства.

Поиск точного решения уравнений кинематики движения змей не возможен для систем, имеющих степень свобод более двух. По этому, один из способов исследования кинематики искусственных локомоционных мод многозвенных роботов - это создание модели робота и дальнейшее исследования.

Создание испытательной 3D модели в работе, было выполнено в программном комплексе MSC. ADAMS. Программа - используются для разработки и совершенствования конструкций фактически всего, что движется – от простых механических и электромеханических устройств до автомобилей и самолетов, железнодорожной техники, космических аппаратов и т.д.[26].

## 2.2 Тип исследуемых локомоционных мод

Искусственную локомоционную моду будем задавать путем создания плоской горизонтальной бегущей волны вдоль скелетной линии змееподобного робота. Для формирования такой локомоции, необходимо на

каждый шарнир звена, скелетной линии робота задать гармоническую зависимость углов поворота  $\theta$  от времени  $t$ :

$$\theta_j(t) = \theta_0 \sin(\omega t + j\varphi) \quad (1)$$

где  $\theta_0$  - предельный угол отклонения шарнира от положения равновесия,  $\omega$  - угловая скорость двух звеньев относительно друг друга,  $j$  – число шарниров  $0,1,2\dots j$ ,  $\varphi$  - разность фаз между шарнирами.

### 2.3 Математическое описание параметров формы змееподобного робота

При реализации такой моды (1) вдоль тела змееподобного робота, устанавливаются геометрические, а также кинематические характеристики формы бегущей волны. К кинематическим характеристикам в этой работе относится скорость змееподобного робота  $v_0$  относительно глобальной системе координат (земли), которая и будет служить критерием оптимальности<sup>1</sup> скоростных качеств движения змееподобного робота.

Из геометрического числа параметров, следует выделить несколько параметров, которым удовлетворяет теме и цели написания данной работы, а именно для оптимальности подбора бегущей волны вдоль скелетной линии змееподобного робота достаточно исследовать следующий набор параметров:  $n$  - число длин волн бегущей волны,  $A$  – амплитуда бегущей волны,  $v$  - скорость распространения волны вдоль скелета. Каждый из выше перечисленных параметров по отдельности зависит от коэффициентов входящих в гармоническую зависимость угла поворота звена от времени(2) соответственно.

$$\theta_j(t) = \theta_0(A) \sin(\omega(v)t + j\varphi(n)) \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> Важнейшим качеством змееподобного устройства, является скорость. Как правило, скорости змееподобных устройств не велики[1], а степень проходимости преобладающая.

Изменяя по отдельности коэффициенты в гармоническом выражении(1), изменяется соответственно и форма бегущей волны, следовательно, и кинематические характеристики. Исследование зависимости геометрических параметров бегущих волн от кинематических характеристик, а также нахождение оптимальной формы бегущей волны - и есть цель исследования этой работы.

#### **2.4 Расчетная оценка кинематики механизма в целом выполненных в программе MSC.ADAMS.**

Исследования были выполнены в программной среде MSC.ADAMS. ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) – программный комплекс для кинематического и динамического анализа механизмов и машин, являющийся одним из ведущих в мире разработчиков подобного программного обеспечения[27].

В рамках поставленного задания была создана плоскопараллельная механическая модель змееподобного робота. В пакете ADAMS, выходными данными расчета являются координаты скорости, ускорения[28].

### 3. Практическая часть

Исследование параметров формы змееподобного робота начнем с числа длин волн  $n$ . Для определения количества волн  $n$ , следует знать, каким коэффициентом можно изменять данный параметр в гармоническом уравнении(1) и какова его зависимость. Очевидно, что единственный коэффициент способный изменить число длин волн в уравнении(1) это разность фаз между звеньями  $\varphi$ . Для определения зависимости  $\varphi(n)$  рассмотрим мгновенную форму тела змееподобного робота, зафиксировав параметр времени  $t$  в уравнении (1), для двух любых значений  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = \pi/2$ .

Для  $\varphi_1 = 0$ , получаем:

$$\theta_0(t) = \theta_0 \sin(\omega t)$$

$$\theta_1(t) = \theta_0 \sin(\omega t),$$

$$\theta_2(t) = \theta_0 \sin(\omega t),$$

$$\theta_3(t) = \theta_0 \sin(\omega t),$$

$$\theta_4(t), = \theta_6(t) = \dots \text{ и т.д.}$$

Для  $\varphi_2 = \pi/2$ :

$$\theta_0(t) = \theta_0 \sin(\omega t)$$

$$\theta_1(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \pi/2),$$

$$\theta_2(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \pi),$$

$$\theta_3(t) = \theta_0 \sin(\omega t + 3\pi/2),$$

$$\theta_4(t) = \theta_0 \sin(\omega t + 2\pi) \dots \text{ и т. д.}$$



Для первого случая  $\varphi_1 = 0$  получается, что шарнир каждого звена изменяется, так же как и предыдущий без какого либо запаздывания. То есть в первом случае бегущая волна не будет реализовываться, и следовательно  $n = 0$ . Второй же случай, когда  $\varphi_2 = \pi/2$ , будет реализовываться запаздывание угла поворота шарнира каждого звена на  $\pi/2$  и следовательно угол поворота шарнира  $\theta_j$  вернется в своё начальное значение через 4 шарнира:

$$\theta_0(t) = \theta_0 \sin(\omega t) = \theta_0 \sin(\omega t + 2\pi) = \theta_4(t) \quad (3)$$

Продолжая перебирать значения  $\theta_j$  до конечного шарнира  $j$ , приходим к общему выражению зависимости разности фаз от числа длин волн:

$$\varphi(n) = \frac{2n\pi}{j} \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет нам изменять число длин волн  $n$  в зависимости от коэффициента  $\varphi$ , входящего в гармоническое уравнение бегущей волны (1). График зависимости скорости движения змееподобного робота в глобальной системе координат от предельного угла отклонения шарнира  $\theta_0$ , позволяет вычислить при каких значениях  $\theta_{0max}$  реализуется максимальная скорость.

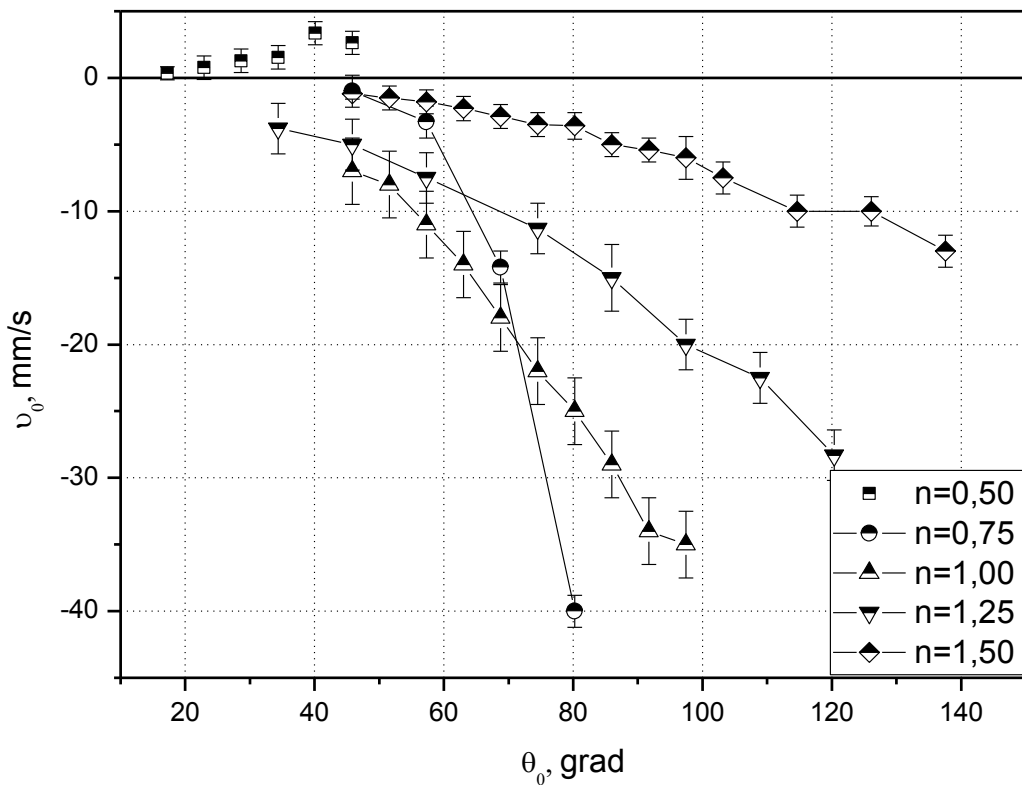


Рис. 6. График зависимости скорости движения змееподобного робота в глобальной системе координат от предельного угла отклонения шарнира.

Число шарниров  $j = 7$ .

Максимальный предельный угол отклонения шарнира  $\theta_{0max}$ — это угол отклонения шарнира звена, при которых модули змееподобного робота будут касаться друг друга. При таких углах, форма змееподобного робота будет напоминать как бы перевернутую восьмерку рис. 7. На рис. 6, это будут конечные точки кривой по оси  $\theta_0$ , так как при дальнейшем увеличении  $\theta_0$ , звенья змееподобного робота будут взаимодействовать друг с другом, что приведет к поломкам устройства.

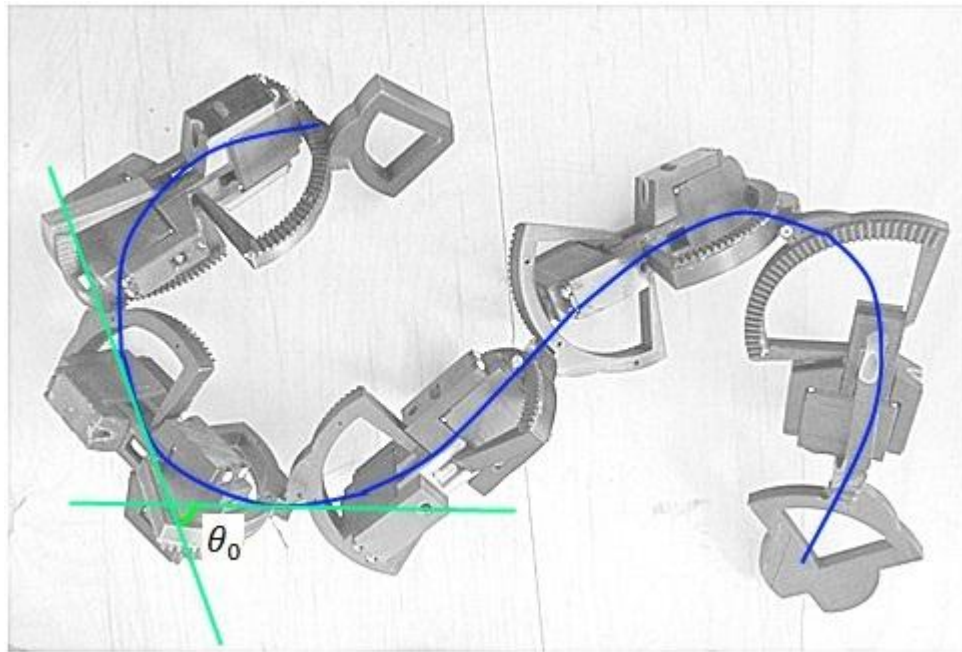


Рис. 7. Форма макета змееподобного робота при отклонения шарниров на угол  $\theta_0$ . Скелетная линия выделена синим цветом. Число шарниров  $j = 5$

Для того что бы теоретически рассчитать максимальные предельные углы  $\theta_{0max}$ , достаточно просуммировать эти углы  $\pi - \theta_0$  (т. к.  $\theta_0$  является внешним углом) для шарниров входящих в полуволну  $\frac{n}{2}$  и приравнять их  $\pi(\frac{j}{2n} - 2)$ , как сумма углов в многоугольнике[29]. В половину волны укладывается шарниров  $\frac{j}{2n}$ . Тогда условие максимума для углов  $\theta_0$ , будет достигнуто тогда, когда сумма этих углов будет равна  $\pi(\frac{j}{2n} - 2)$ . В результате получаем:

$$(\pi - \theta_{0max}) \frac{j}{2n} = \pi(\frac{j}{2n} - 2)$$

Тогда

$$\theta_{0max} = \frac{4\pi n}{j} \quad (5)$$

По формуле (5) рассчитываются максимальные предельные углы отклонения шарнира звена  $\theta_{0max}$  от числа длин волн, вдоль скелета змееподобного робота с числом звеньев  $j$ .

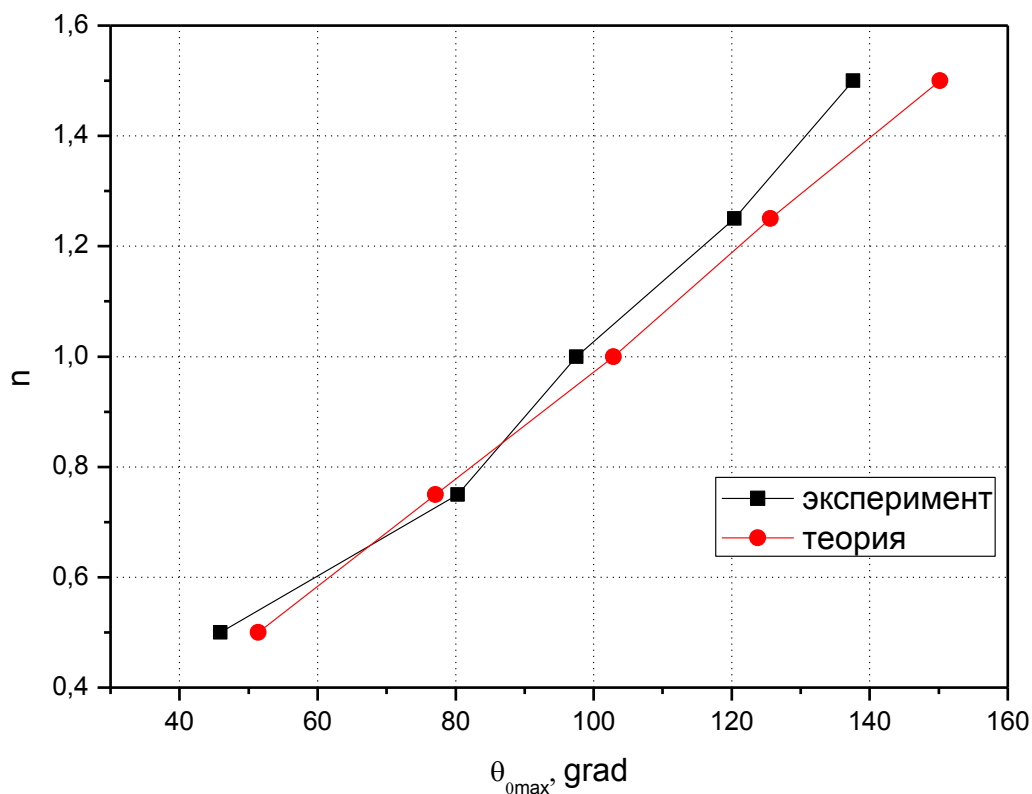


Рис. 8. График зависимости числа длин волн от максимального предельного угла отклонения шарнира звена. Число шарниров  $j = 7$ . Эксперимент и теория.

На рис. 8. изображен график результатов, полученных в ходе эксперимента и теоретических расчетов максимальных предельных углов  $\theta_{0max}$  отклонений шарниров змееподобного робота от числа длин волн  $n$ . Из рис. 8 можно заметить, что начиная от значений углов отклонения шарниров 100 градусов и выше постепенно увеличивается разница между экспериментальной линией и теоретической. Это обусловлено тем, что форма змееподобного робота изменяется, то есть становится более вытянутая восьмерка. При расчетах

улов, начиная свыше 100 градусов, следует в выражении (4) учитывать коэффициент формы.

При максимальных предельных углах отклонения шарнира  $\theta_{0max}$ , будет так же устанавливаться максимумы скоростей согласно проведенному эксперименту (рис.6). Для различных значений  $n$  максимальная скорость будет так же различна. Следовательно, что бы исследовать число длин волн  $n$  от скорости, и решить задачу о нахождении оптимального значение по  $n$ , нужно найти зависимость  $v_0(n)$  при максимальных предельных углах отклонения шарнира  $\theta_{0max}$ , так как максимум скорости змееподобного робота устанавливается в этих точках рис 6.

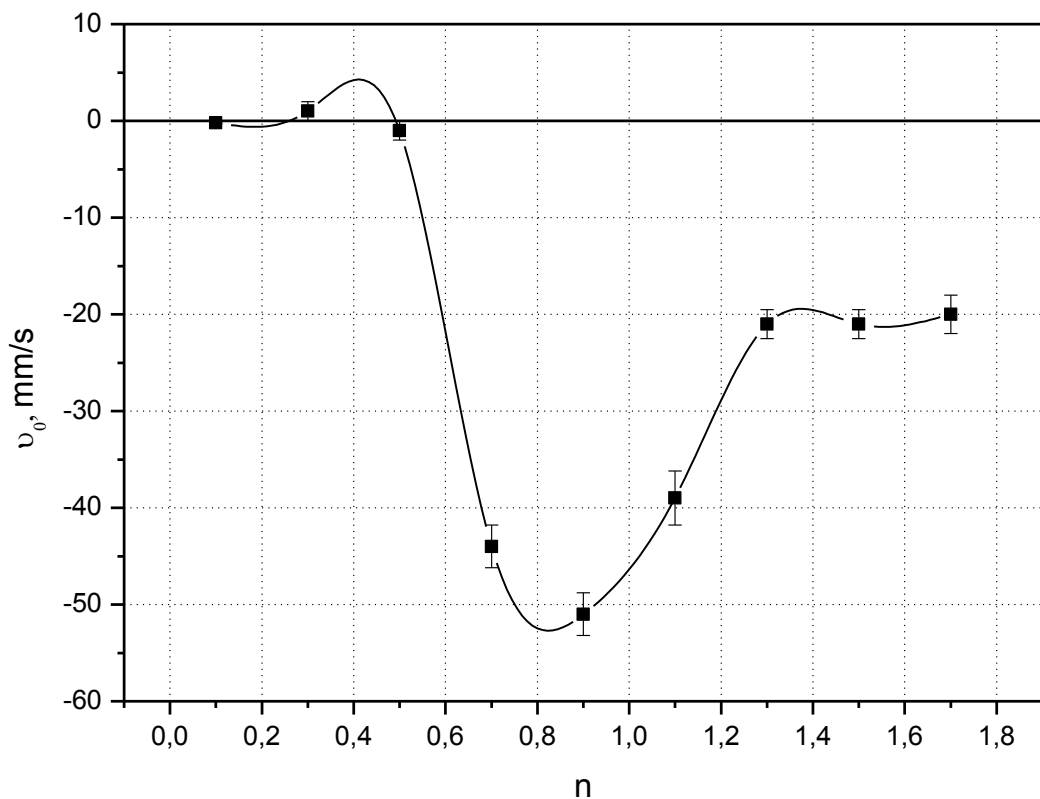


Рис. 9. График зависимости скорости движения змееподобного робота в глобальной системе координат от числа длин волн. Число шарниров  $j = 7$ .

Результаты исследования зависимости скорости змееподобного робота от числа длин волн  $n$  укладываемых вдоль скелетной линии, приведён на рис. 9. Как видно из рис.9, максимальная скорость соответствует числу волн  $n = 0,8$ . Дальнейшее увеличение числа длин волн приводит к плавному снижению скорости устройства. Максимальное число длин волн, которое могло бы установиться, зависит от числа шарниров  $j$  входящих в тело робота. К примеру, у змееподобного робота, имеющего число звеньев  $j = 7$ , наибольшее число волн  $n$  равно 3,5. При таких критических значениях  $n_{кр}$  вдоль тела змееподобного робота устанавливается стоячая волна, и скорость змееподобного робота равна нулю, так как не возникает бегущей волны. Критическое значение числа волн  $n$  для змееподобного робота с числом шарниров  $j$ , можно получить, если в выражении (4) принять разность фаз между двумя шарнирами равной  $\pi$ . В таблице 1 приведены некоторые результаты расчетов критических значений чисел длин волн для змееподобных роботов с числом шарниров  $j$ .

$j$	$n_{кр}$
4	2
5	2,5
6	3
7	3,5
8	4
9	4,5
10	5
.....	.....

Таблица 1. Расчет критических значений длин волн для различных змееподобных роботов.

Для обоснования оптимальности найденного параметра  $n$ , найдем аналогичную зависимость, но для других значений  $j$  рис. 10.

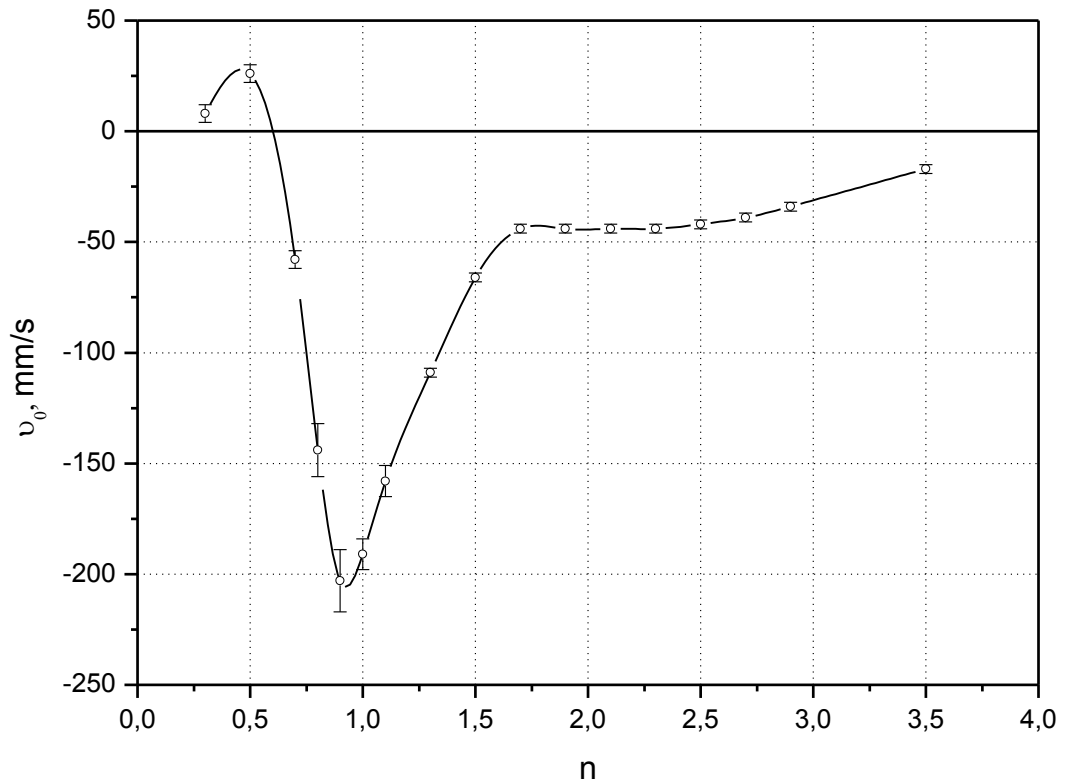


Рис. 10. График зависимости скорости движения змееподобного робота в глобальной системе координат от числа длин волн. Число шарниров  $j = 17$ .

Вывод:

- 1) В результате проведенного исследования, были найдены оптимальные числа длин волн  $n$ . При реализации оптимальной искусственной локомоции змееподобного робота, описываемые выражением(1), вне

зависимости от числа шарниров  $j$  входящих в тело робота, следует брать значения  $n$  порядка 0,8-0,9.

- 2) При числах длин волн равных  $n = 0,8 - 0,9$ , и значениях максимального угла отклонения шарнира, равных  $\theta_{0max}$ , форма скелета змееподобного робота переходит с синусоиды на незамкнутую восьмерку рис. 11.



Рис. 11. Форма скелетной линии змееподобного робота. а – форма скелета когда предельный угол отклонения звена составляет значения меньше  $\theta_{0max}$ , б – форма скелета при значениях равных  $\theta_{0max}$ .

Направление движения змееподобного робота на рис. 11 - различна. Когда форма скелетной линии змееподобного робота - синусоида (а) – движение устройства сонаправленно со скоростью распространения бегущей волны вдоль тела. При реализации формы скелетной линии в виде не замкнутой восьмерки, устройство продолжает двигаться сонаправленно скорости распространения бегущей волны, но дополнительно возникает составляющая скорости робота, которая направленно перпендикулярно скорости распространения бегущей волны.



### 3 Заключение

В ходе исследования была синтезирована новая двухмерная искусственная локомоционная мода движения змееподобного робота. Линия скелета змееподобного робота при такой локомоции напоминает не замкнутую восьмерку рис. 11, б. Для реализации локомоции необходимо на каждом шарнире звена змееподобного робота задать гармоническую зависимость углов поворота  $\theta$  от времени  $t$ :

$$\theta_j(t) = \theta_0 \sin(\omega t + j\varphi) \quad (1)$$

где  $j$  общее число шарниров.

Найдены значения коэффициентов  $\theta_0, \omega, \varphi$  в гармоническом уравнении(1) являющимися оптимальными для данной локомоционной моды. Рассчитываются коэффициенты по выражениям (4) и (5), при условии, что число  $n=0,8$  (найдено экспериментально рис. 9) . В таблице 2 приведены некоторые результаты расчетов коэффициентов  $\theta_0, \omega, \varphi$ .

$j$ , число шарниров	$\theta_0$ , рад	$\omega$ , рад/с	$\varphi$ , рад
4	2,6	-	1,26
5	2,0	-	1,00
6	1,7	-	0,84
7	1,4	-	0,71
8	1,3	-	0,62
9	1,1	-	0,55
10	1,0	-	0,50
11	0,9	-	0,46
12	0,8	-	0,42

Таблица 2. Результаты расчетов коэффициентов входящих в гармоническое уравнение (1) для змееподобных роботов с числом шарниров от 4 до 12.

Угловая скорость двух звеньев относительно друг друга  $\omega$  определяется в результате анализа поверхности, на которой будет эксплуатироваться змееподобный робот.

Найденный тип искусственной локомоционной моды, в виде не замкнутой восьмерки, имеет некоторые схожести по форме с движением сухопутной змеи, которая использует биоморфную моду – боковой ход. Различие в том, что сухопутная змея использует пространственную локомоцию. Переходя к технической части, моделирование пространственных мод, а также конструкционные задачи заметно усложняются. Следовательно, дальнейшее развитие и исследования такой локомоции является актуальной задачей на сегодняшний день.

#### 4 Список литературы

1. *Литинецкий. И.Б.* Бионика // Пособие для учителей. М., «Просвещение», 1976. стр. 116-120
2. *Umetani Y., Hirose S.* Biomechanical Study of Serpentine Locomotion // Proc. 1st RoManSy Symp. '73, Udine, Italy, Springer-Verlag. 1974. P. 171-184.
3. *Hirose S.* Biologically Inspired Robots. Snake – like Locomotors and Manipulators // Oxford University Press, 1993 (translation of 1987 Japanese edition).
4. *Umetani, Y. (1970).* Mechanism and control of serpentine movement(kinematics of locomotion and model experiment). In *proceeding of the 1st Biomechanism Symposium*, pp. 253-60. [In Japanese.]
5. *S. Hirose, M Mori,* «Biologically inspired Snake – like Robots», Proceedings of the 2004 IEEE international Conference on Robotics and Biomimetics, August 22- 26, 2004, Shenyang, China.
6. *H. Yamada, M. Mori, S. Hirose,* «Stabilization of the head of an undulating snake – like robots» Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robotics and System San Diego, CA, USA, Oct 29 – Nov 2, 2007.
7. *Hirose* Fukushima Robotics Lab., Tokyo Institute of Technology, <http://www-robot.mes.titech.ac.jp>, Online Access, 2010.
8. *А.В. Борисов, В.Е. Павловский, Д.В.Трещев.* Бионические роботы: змееподобные мобильные роботы и манипуляторы // Лаборатория нелинейного анализа и конструирования новых средств передвижения. 2014г.
9. *Chernousko F., Pfeiffer F., Sobolev N.* Experimental Study of Shake – Like Locomotion of a Three – Link Mechanism // IUTAM Symposium on Vibration Control of Nonlinear Mechanisms and Structures Solid Mechanics and Its Applications. 2005. Vol. 130.

10. *Rainer Worst, Bernhard Klaassen, Hartmut Surmann, Joachim Hertzberg.* IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR 2004.
11. *Ralf Linnemann, Karl L. Paap, Bernhard Klaassen, Jurgen Vollmer.* Motion Control of a Snakelike Robot // GMD – German National Research Center for Information Technology Schloss Birlinghoven
12. *Dowling K.,* Terrestrial locomotion without wheels or legs, A Thesis Proposal The Robotics Institute, Carnegie Mellon, Pittsburgh, PA 1997 г.
13. *Duff D.G., Mark Y.M.* Evolution of PolyBot: A Modular Reconfigurable Robot // In Proceedings of the Harmonic Drive, International Symposium, 2001.
14. *Dowling, Kevin J. Limbless Locomotion.* Learning to Crawl with a Shake Robot // Pittsburgh, PA: s.n., 1997.
15. *Hirose S., Yamada H.* Snake – like robots // Robotics and Automation Magazine, IEEE. Vol. 16. Issue L. March 2009. P. 88-98.
16. *Yim M., Zhang Y., Duf D.* Modular robots// IEEE Spectrum. 2002.
17. *Wright C., Johnson A., Peck A. et al.* Design of a Modular Snake Robot // In Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Oct 29. 2007. N. 2. P. 2609-2614.
18. *Brown H. Ben, Schwerin Michael, Shammass E., H. Chjset* Design and Control of Second-Generation Hyper – Redundant Mechanism // In proceedings of the 2007 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Oct 29. 2007. N. 2. P. 2603-2608.
19. *Lipkin K., Brown I., Peck A. et al.* Differentiable and Piecewise Differentiable Gaits for Snake Robots // In Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Oct 29. 2007. N. 2. P. 1864-1869.
20. *Иванов А.А., Рогов А.В., Телешев Н. С.* Виртуальный прототип и физический макет змеевидного робота// Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. 8 Всероссийской научно – практической

- конференции. Т. 5. Экстремальная робототехника. СПб.: НПО СМ. 2005. С. 116-121.
21. Демидов Д.А., Шмаков О. А., Иванов А.А. Синтез локомоционных мод змеевидного робота на основе сложения бегущих волн // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. IX Всероссийской научно-практической конференции. Т. 5. Экстремальная робототехника. СПб.: НПО СМ. 2008. С. 297-303.
22. Демидов Д.А., Шмаков О. А., Иванов А.А. Мобильные змеевидные роботы: теория и практика // Известия высших учебных заведений ISSN 0536-1044 Машиностроение. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. Стр. 32-41
23. Юревич Е.И., Иванов А.А. Исследование и реализация принципов создания ползающих роботов, ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, 2004 г.
24. Иванов А.А. Исследование принципов локомоций гиперизбыточных ползающих роботов, СПбГПУ, ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, 2004 г.
25. Gray J. The mechanism of locomotion in snakes // Department of Zoology, University of Cambridge, 1946
26. Сайт MSC Softwar, разработчик программных продуктов  
<http://www.mssoftware.ru/products/adams>
27. В. С. Мельнтьев, А.С. Гвоздев, Д. С. Лёжин. Лабораторный практикум по использованию MSC.ADAMS. Учебное пособие. – Самара: Изд-во Самара. Гос. Аэрокосм. Ун-та, 2013.
28. Мелентьев В.С., Гвоздев А.С. Adams/post Processor: краткий справочник пользователя: Учебное пособие. – Самара: Изд-во Самара. Гос. Аэрокосм. Ун-та, 2006. – 105 с.: ил.
29. Л.С. Атанасян, В.Ф. Бутузов, С.Б. Кадомцев, Э.Г. Позняк, И.И. Юдина. Геометрия. Учеб. для общеобразоват. учреждений. -20-е изд. – М. : Просвещение, 2010. – 99с.

