

УДК 621.865:004.896

А.А. Иванов, О.А. Шмаков, Д.А. Демидов
Санкт-Петербург, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗМЕЕВИДНОГО РОБОТА «ЗМЕЕЛОК-3»

A.A. Ivanov, O.A. Shmakov, D.A. Demidov
St.-Petersburg, Russia

AN EXPERIMENTAL STUDY OF SNAKE ROBOT «ZMEELOK-3»

Приведено описание конструкции и программно-аппаратных решений змеевидного робота с универсальными шарнирами-модулями, обладающими повышенными силомоментными характеристиками и подвижностью. Представлены результаты испытаний комплекса при выполнении различных локомоционных мод.

ЗМЕЕВИДНЫЙ РОБОТ. МЕХАТРОННЫЙ МОДУЛЬ-ШАРНИР. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.

A description of the design, software and hardware solutions of the new development authors snake robot with an enhanced torque and a mobility universal joints are presented. The results of the test set for the various modes of locomotion are discussed.

SNAKE ROBOT. MECHATRONIC JOINT. THE SOFTWARE ROBOT CONTROL. EXPERIMENTAL STUDY.

Работы по созданию змеевидных роботов S. Hirose в 70-х гг. XX века [1], а также теоретические публикации [2, 3] по алгоритмам управления гиперизбыточными манипуляторами послужили основой для формирования отдельного направления в робототехнике – гиперизбыточные модульные змеевидные мобильные роботы-манипуляторы (ЗР). Развитие технологий изготовления сложных корпусных деталей и появление на рынке эффективных малогабаритных электроприводов позволяют рассматривать возможность создания опытных образцов змеевидных роботов специального применения. Оптимизация конструкции, архитектуры программно-аппаратного обеспечения системы управления и разработка новых алгоритмов для реализации локомоционных мод и манипуляций ЗР являются задачами, актуальность решения которых подтверждается возрастающим потоком публикаций [4].

В период с 2003 по 2011 г. мы получили самостоятельные результаты по алгоритмам планирования и управления локомоциями змеевидных роботов и на основе этих результатов разработали ряд действующих макетов змеевидных роботов. В работе [5] представлен анализ современных

мировых достижений в области разработки змеевидных роботов и подробно описаны результаты, полученные нами на макетах змеевидных роботов «ЗМЕЕЛОК-1», «ЗМЕЕЛОК-2», а также рассмотрен гиперизбыточный манипулятор, модульная конструкция которого использует принципы, заложенные в конструкции змеевидных роботов.

В настоящей статье представлен результат нашей новой разработки: макет змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3», обладающий повышенными силомоментными характеристиками, имеющий более тщательно проработанную конструкцию шарнира и несущего корпуса, обоснованную в работе [6]. Результаты экспериментов подтверждают эффективность конструктивных и аппаратно-программных решений, обеспечивающих скоростные и силовые характеристики на уровне достижений лидирующих разработчиков змеевидных роботов.

Особенности конструкции и аппаратных решений змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3»

Одним из аргументов, выдвигаемым при обосновании реализации змеевидного робота, является возможность создания на основе уни-

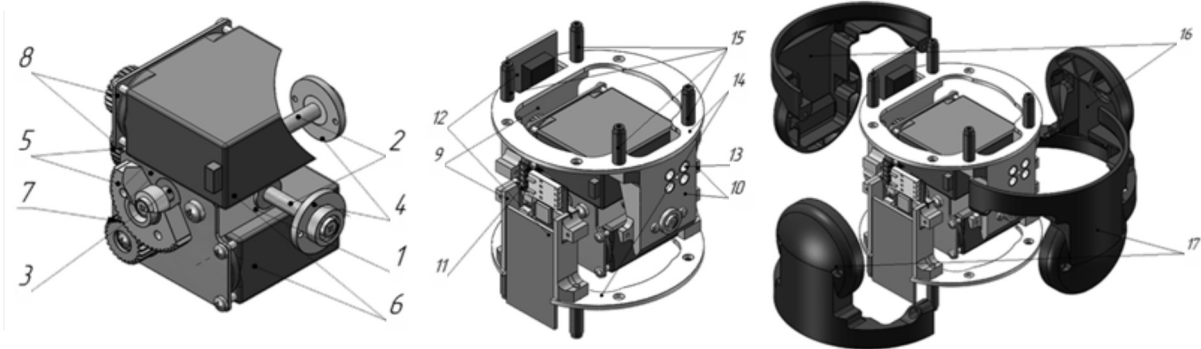


Рис. 1. Корпус шарнира и корпус с установленными кронштейнами с фланцами

фицированного мехатронного модуля-шарнира механической структуры, способной осуществлять локомоции и манипуляции. Качество конструкции шарнира является фактором, определяющим скоростные, адаптивные и силовые характеристики змеевидного робота. Относительная простота реализации змеевидного робота на основе одностепенных модулей, объединяемых в последовательную цепь с чередованием относительной ориентации осей жестко связанных модулей разворотом на прямой угол, приводит к усложнению алгоритмов реализации даже простейших локомоционных мод и повышает требования к силомоментным характеристикам сервоприводов [6]. Конструкция мехатронного модуля с двухступенным универсальным шарниром, обеспечивающим качание в перпендикулярных плоскостях, позволяет строить форму пространственной скелетной ломаной из отрезков постоянной длины и наиболее просто аппроксимировать гладкие кривые локомоционных мод и формы при манипуляциях.

Конструкция модуля представляет собой двухступенной активный шарнир с пересекающимися взаимно перпендикулярными осями, находящимися в одной плоскости. Конструктивно корпус шарнира состоит из основания 1 с зафиксированными на нем полуосями шарнира 2, 3 (рис. 1). На полуосях 2 через шарикоподшипники крепятся втулки пассивных вилок 4, на полуосях 3 крепятся приводные шестерни активных вилок 5. Вращение приводного зубчатого колеса активных вилок осуществляется серводвигателем Nitech 7940TH поз. 6 через редуктор 1:2 поз. 7. Для точного соблюдения межосевого расстояния редуктора, сервопривод и оси базируются посадочными шейками на редукторных пластинах 8.

Активные 9 и пассивные 10 вилки крепятся к выходным зубчатым колесам 5 и втулкам 4. На активных вилках модуля расположены плата управления 11 и питания 12 соответствующей степени шарнира. На пассивных вилках модуля установлены клеммы 13 для коммутации проводов питания и разъем для соединения проводов управления, проходящих транзитно с одной пассивной вилки на другую. Активная 9 и пассивная 10 вилки соответствующих полуосей модуля присоединяются к фланцу поз. 14 стойками поз. 15. При сборке нескольких модулей совместно, стойки 15 одного модуля устанавливаются в посадочные отверстия фланца 14 другого модуля и фиксируются винтами. Клеммы и разъемы пассивных вилок соединяются проводами. На собранный каркас устанавливаются защитные кожухи поз. 16, 17, выполняющие функции опорных корпусов при реализации движений по опорным поверхностям.

Конструктивные элементы модулей ЗР представлены деталями, для изготовления которых использовались традиционные технологии механообработки: фрезерное и токарное оборудование, а также деталями, имеющими пластинчатую форму. Для изготовления соединительных фланцев и редукторных пластин использовалась лазерная резка с последующей обработкой. На левой стороне рис. 2 приведена фотография макета змеевидного гиперизбыточного робота без установленных кожухов.

Для изготовления кожухов применена технология быстрого прототипирования. Мастер-модели кожухов изготовлены на оборудовании ЦНИИ РТК – 3D принтере ObjetEDEN 250. По мастер-моделям изготавливались силиконовые формы, а затем из резиноподобного полиуретана PX761 в силиконовой форме отливались кожухи.



Рис. 2. Фотографии макета змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3» без кожухов (слева) и с кожухами (справа)

На рис. 2 справа представлена фотография макета гиперизбыточного робота с установленными кожухами, предотвращающими повреждение электронных узлов макета и обеспечивающими формирование опорных контактных зон на поверхности перемещения.

В табл. 1 приведены технические характеристики действующего макета ЗР «ЗМЕЕЛОК-3».

Функционирование каждого из двух сервоприводов, входящих в состав мехатронного модуля с ортогональными осями, обеспечивает отдельный комплект блоков: вторичный источник питания, преобразующий напряжение питания от внешнего источника, сервопривод и плата управления на базе микроконтроллера Atmel ATmega8a. Программное обеспечение (ПО) микроконтроллера осуществляет позиционное управление сервоприводом по командам с компьютера верхнего кон-

тура управления ЗР и поддержку полудуплексного обмена данными.

Архитектура программного обеспечения нижнего и верхнего контуров управления

Встроенное ПО блока управления сервоприводом вращения оси мехатронного модуля выполняет функции инициализации микроконтроллеров после подачи напряжения питания от внешнего источника и обработки поступающих по интерфейсу RS485 команд задания, запроса считывания и передачи значения угла поворота выходного вала сервопривода относительно нейтрального положения. Начальные нейтральные положения осей сервоприводов задаются на этапе сборки модулей с помощью программатора 6НПП-21 Plus. На собранном и выложенном на плоскую поверхность макете ЗР по информации с

Таблица 1

Технические характеристики ЗР «ЗМЕЕЛОК-3»

Параметр	Значение
Количество модулей, шт	2–15
Масса модуля, кг	0,35
Масса, кг	0,7–5,25
Длина модуля, мм	80
Диаметр, мм	80
Максимальный момент на каждой оси модуля, кН*мм	3,2
Количество сервоприводов, шт.	4–30
Напряжение питания, В	40
Связь с ПК	USB
Электропитание	Внешний источник



датчиков обратной связи абсолютного положения проводятся корректировка значений кодов нейтрального положения и запись их в таблицу корректировки углов верхнего контура управления.

Каждый микроконтроллер в цепи содержит уникальный идентификатор, определяющий положение модуля в последовательной цепи. Идентификатор присваивается при первоначальном программировании микроконтроллера в соответствии с порядком следования его в цепи модулей. При получении команды изменения положения выходного вала сервопривода микроконтроллер выбирает из поля данных данные в соответствии со своим уникальным идентификатором. Согласно полученным данным микроконтроллер вырабатывает управляющий временной импульс для сервопривода.

Получение информации об истинном положении выходных валов сервоприводов осуществляется с использованием одного из двух алгоритмов. Первый алгоритм заключается в поочередном запросе к каждому звену цепи и получении от него информации о положении сервопривода. Второй алгоритм состоит в «лавинном» получении информации. Выбирается звено, с которого необходимо начать получение значений углов поворота сервоприводов, и отправляется сообщение группового запроса со специальным идентификатором. Все микроконтроллеры подключены к общей шине данных. Каждый из них имеет возможность отслеживать поступление запроса и окончание выполнения ответа микроконтроллером, номер которого на единицу отличается от собственного номера микроконтроллера. При поступлении группового запроса все микроконтроллеры выполняют определение текущего положения выходного вала. Однако отправку информации осуществляет только микроконтроллер с указанным идентификатором. После отправки с предыдущего контроллера данных обратной связи звено с идентификатором, отличающимся на единицу, автоматически без получения повторного запроса передает данные о состоянии своего сервопривода. Процесс прекращается по достижении максимального номера.

Для реализации локомоционных и манипуляционных функций гиперизбыточных роботов используются разработанные ранее [7] алгоритмы, использующие аналитические зависимости и вербальные правила. Для управления моделью гиперизбыточного робота разработано ПО, реа-

лизирующее эти алгоритмы управления. Основной задачей программного обеспечения верхнего контура управления является формирование управляющих команд, позволяющих формировать локомоционные моды движения, управление целенаправленным движением ЗР и манипуляциями модулей, из которых состоит робот. Двухсторонний информационный и управляющий обмен ПО верхнего контура управления со змеевидным роботом осуществляется через переходник USB-RS485. Программное обеспечение верхнего контура управления реализовано на ПК с ОС WINDOWS-7 и реализует функции интерфейса пользователя для задания режимов движения, выбора локомоционных мод, выполнения манипуляционных операций и составных во времени движений. Алгоритмы планирования движений реализованы в программе верхнего контура управления.

Программное обеспечение верхнего контура управления состоит из трех основных уровней: уровня взаимодействия с оператором (UI), основного уровня (MAIN) и уровня работы с устройствами ввода/вывода ПК (I/O). Уровень взаимодействия с оператором отвечает за взаимодействие с оператором через графический оконный интерфейс и получение управляющих команд с джойстика. Основной уровень отвечает за обработку данных, полученных с уровня взаимодействия с оператором, формирование на их основе управляющих пакетов, отправляемых на устройства ввода/вывода (третий уровень), за обработку данных, полученных с устройств ввода/вывода, реагирование на них, формирование на их основе информационных пакетов, передаваемых первому уровню для отображения. Уровень работы с устройствами ввода/вывода отвечает за прием/передачу сформированных пакетов на виртуальные последовательные порты персонального компьютера и прием данных о положении рычага джойстика и кнопок.

Основное взаимодействие с оператором осуществляется через оконный интерфейс. Оконный интерфейс программы состоит из одного основного окна и трех дочерних окон, которые запускаются из него: основное окно, окно отображения формируемых абсолютных, относительных углов всех волн (главной и встречной), окно терминала входящей и исходящей информации с виртуального последовательного порта ПК.

Основное окно служит для ввода параметров

локомоционных мод, выбора параметров из пополняемого списка, отображения текущих параметров волн, настроек виртуального последовательного порта ПК, задания манипуляционных движений модулей, выбора настроек для выполнения типовых мод.

В основном окне на главной панели управления параметрами оператор может ввести или выбрать из имеющихся параметры локомоционных мод движения. На главной панели управления расположены кнопки запуска/останова формирования управляющих команд в цикле и пошаговом режиме, кнопка сбора параметров, кнопка обнуления текущего времени с выпадающим меню управления временем (изменение направления счета времени, шаг дискретизации времени, изменение текущего времени просчета параметров), кнопка обнуления параметров. Вспомогательная панель – это динамическая панель, которая изменяет свое назначение в зависимости от способа формирования локомоционных мод и управляющих команд, также может служить для расширенного отображения и ввода всех параметров программы, кроме того, в этой части окна идет отображение информации с бортовой видеокамеры робота. Изменение назначения осуществляется с помощью кнопок на панели управления программой. На основной информационной панели всегда отображаются текущее время робота и текущее время компьютера, состояние последовательного порта ПК, с которым происходит информационный обмен, статус программы, т. е. отображение последней выполненной операции. При попытке выполнения некорректных действий текст сообщения об ошибке и рекомендации по ее исправлению выводится на экране. Например, при попытке отправки данных на неинициализированный последовательный порт ПК выдается сообщение о необходимости открыть порт.

Окна визуализации локомоционных мод, отображения формируемых абсолютных и относительных углов для всех типов волн, а также окно терминала входящей и исходящей информации с последовательного порта ПК являются информационными и необходимы при отладке.

Окно списка операций предназначено для выбора типовых мод и их выстраивания для последовательного выполнения, в т. ч. и реализации алгоритма планирования движения по заданной траектории и манипуляций при осмотре местности.

Результаты экспериментальных исследований

Модель гиперизбыточного робота прошла исследовательские испытания, в ходе которых проверены силомоментные, скоростные и энергетические характеристики. Определены отличия реализованных характеристик от заявляемых производителем сервоприводов. Определены режимы безопасного использования устройства. Момент, развиваемый сервоприводом, обеспечивает статическое консольное удержание в поле силы тяжести цепи из пяти модулей.

После сборки и отладки модели были проведены экспериментальные исследования алгоритмов управления. На рис. 3 представлены кадровые развертки видеорегистрации движения ЗР для частоты изгибных колебаний 1 Гц в различных модах: «прямой ход», «боковой ход», а также энергетически эффективная мода «качение». Все моды формируются сложением волн изгибания в ортогональных плоскостях и характеризуются амплитудой угла отклонения от прямолинейной формы касательной к проекции скелетной кривой на соответствующую плоскость.

Локомоционная мода «прямой ход» формируется сложением двух ортогональных бегущих волн [7] с соотношением периодов 1:2. На рис. 3 а представлены начальное и конечное положение ЗР в покое и последовательные кадры с шагом 3 с при реализации моды с амплитудами горизонтальной волны 15 градусов, вертикальной 5 градусов. Ракурс съемки не позволяет правильно оценить пройденное расстояние, которое составило 2 м. Средняя скорость перемещения ЗР составляет 0,074 м/с.

Локомоционная мода «боковой ход» формируется сложением двух ортогональных бегущих волн [7] одинакового периода с относительным фазовым сдвигом на четверть периода. На рис. 3 б представлены начальное и конечное положение ЗР в покое и последовательные кадры с шагом 2,5 с при реализации моды с амплитудами горизонтальной волны 15 градусов, вертикальной 5 градусов. Пройденное расстояние 3 м. Средняя скорость перемещения ЗР составляет 0,13 м/с.

Локомоционная мода «качение» («спин») формируется сложением двух ортогональных стоячих волн [7] со сдвигом во временной области на четверть периода. На рис. 3 в представлены начальное и конечное положение ЗР в покое и последовательные кадры с шагом 2 с при ре-

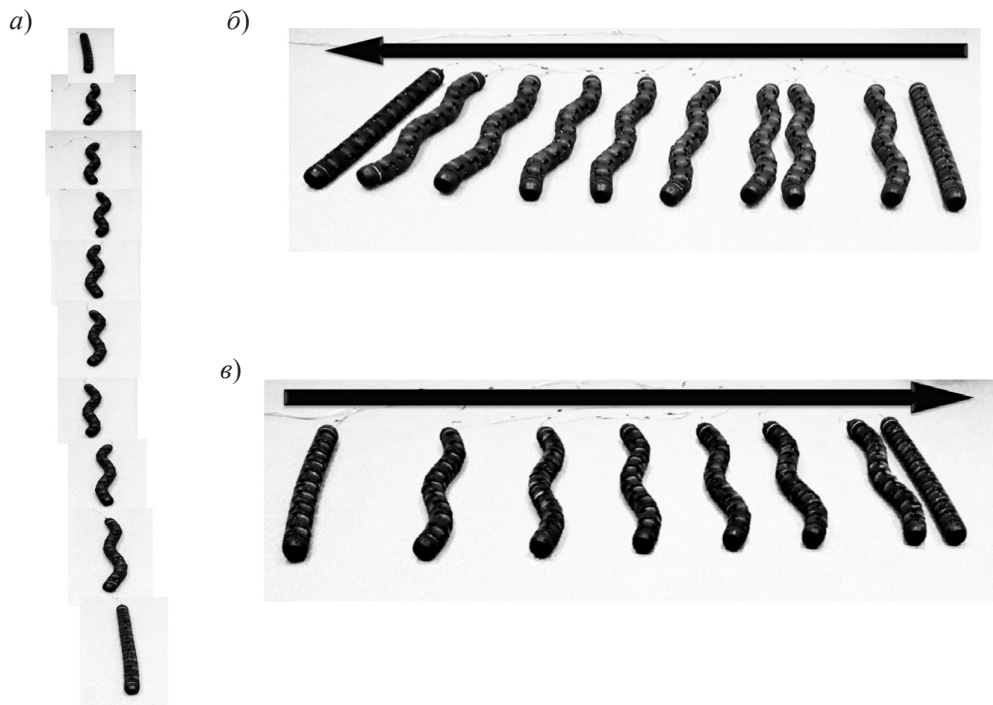


Рис. 3. Последовательные фазы движения ЗР при реализации локомоционных мод:
a – «прямой ход»; *б* – «боковой ход»; *в* – «качение»

лизации моды с амплитудами горизонтальной и вертикальной волн 15 градусов. Пройденное расстояние 3 м. Средняя скорость перемещения ЗР составляет 0,21 м/с.

Максимально достигнутые в экспериментах значения скоростей перемещения ЗР в модах «прямой ход» и «боковой ход» при амплитудах горизонтальных волн 40 градусов и частоте колебаний 1 Гц приведены в табл. 2. Там же для сравнения представлены результаты, достигнутые при схожих параметрах в моделях предыдущих конструкций.

Благодаря принятым мерам по уплотнению компоновки модуля на основе рекомендаций по конструктивному обоснованию [6], габаритные размеры модулей не превосходят соответствующие размеры прежних моделей. Обновленное ПО системы управления позволяет выполнять движения в большинстве известных мод, синхронизировать временные интервалы приема/передачи данных, минимизируя рассогласование астрономического времени и времени операционной системы.

Результаты экспериментов показывают, что разработанная модель змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3» имеет существенно лучшие силовые и скоростные показатели по сравнению с ранними версиями. Однако повышенное энергопотребление для их реализации делает невозможным реализацию автономного по питанию ЗР с достигнутыми показателями. Модель используется для отработки новых режимов движения и алгоритмов управления с целью выработки правильных конструктивных и программно-аппаратных решений при создании специальных мобильных роботов змеевидного типа.

Работа выполнена в рамках тематического плана ЦНИИ РТК в 2011 г. и в рамках государственного задания ЦНИИ РТК в 2012 г.

Таблица 2

Скорости перемещения ЗР

Мода	«ЗМЕЕЛОК-1»	«ЗМЕЕЛОК-2»	«ЗМЕЕЛОК-3»
Прямой ход, см/с	2,3	10	20
Боковой ход, см/с	8	20	40

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hirose, S.** Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators [Text] / S. Hirose. –UK: Oxford University Press, 1993 (translation of 1987 Japanese ed.).
2. **Chirikjian, G.S.** A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics [Text] / G.S. Chirikjian, J.W. Burdick // Robotics and Automation, IEEE Transactions on, Jun 1994. –Vol. 10. –Iss. 3. –P. 343–354.
3. **Ben Brown, H.** Design and Control of a Second-Generation Hyper-Redundant Mechanisms [Электронный ресурс] / Brown Ben H., M. Schwerin, E. Shamma // In Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems. –San Diego, CA, USA. –Oct. 29-Nov. 2, 2007. –P. 2603–2608.
4. 2012 IEEE International Conf. on Robotics and Automation River Centre [Электронный ресурс]. –Saint Paul, Minnesota, USA. –May 14-18, 2012.
5. **Иванов, А.А.** Мобильные змеевидные роботы: теория и практика [Текст] / А.А. Иванов, Д.А. Демидов, О.А. Шмаков // Машиностроение. Спецвыпуск Специальная робототехника и мехатроника. –М., 2011. –С. 32–41.
6. **Иванов, А.А.** Анализ конструктивных компонентов двухступенного мехатронного модуля для змеевидного робота [Текст] / А.А. Иванов //Международ. науч.-технич. конф. Экстремальная робототехника 23-25 ноября 2011. –СПб., 2011. –С. 104–110.
7. **Иванов, А.А.** Синтез локомоционных мод змеевидного робота на основе сложения бегущих волн [Текст] / А.А. Иванов, Д.А. Демидов, О.А. Шмаков // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника. Тр. XI Всерос. науч.-практич. конф. – СПб.: НПО специальных материалов, 2008. –Т. 5. –С. 297–303.