

## 3D ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЕЧНОСТЕЙ ЗООМОРФНОГО РОБОТА

Д.т.н. Н.В. Замирец<sup>1</sup>, к.т.н. В.В. Евсеев<sup>2</sup>, к.т.н. В.И. Роменский<sup>2</sup>, В.Э. Салиева<sup>2</sup>

1. Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г.Харьков

2. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

*В статье предложена упрощенная блочная структурная схема зооморфного робота, которая спроектирована на базе анализа опорно-двигательной системы бионического образца семейства кошачьих. Особенностью данной конструкции является ее разбиение на отдельные блоки, которые в контексте данного решения, позволят увеличить степени свободы звеньев. Разработана детализированная 3D модель сборки передней и задней конечности, в которой плавность перемещений зооморфного робота достигается за счет крепления перемещающихся деталей к серводвигателям через направляющие и пружины. Для доказательства адекватности предложенных конструкторских решений было проведено моделирование основных несущих элементов конструкции с использованием САЕ ANSYS, которое подтвердило, что спроектированные детали удовлетворяют требованиям, предъявляемым к зооморфному роботу.*

*У статті запропонована спрощена блочна структурна схема зооморфного робота, що спроектована на базі аналізу опорно-рухової системи біонічного зразку сімейства кошачих. Особливістю даної конструкції є те, що вона розбита на окремі блоки, що в контексті даного рішення, дозволять збільшити ступені свободи ланок. Розроблена деталізована 3D модель збірки передньої і задньої кінцівки зооморфного робота, в якій плавність руху досягається за рахунок прикріплення деталей до серводвигунів через направляючі і пружини. Для доказу адекватності запропонованих конструкторських рішень було проведено моделювання основних несучих елементів конструкції з використанням САЕ ANSYS, що підтвердило, що спроектвані деталі задовольняють вимогам, що висуваються до зооморфного робота.*

*The article offers a simplified block diagram of a zoomorphic robot, which is designed based on the analysis of the musculoskeletal system of the bionic sample of the cat family. A feature of this design is its breakdown into separate blocks, which, in the context of this decision, will increase the degrees of freedom of links. A detailed 3D model for assembling the anterior and posterior limbs has been developed, in which the smoothness of movements of the zoomorphic robot is achieved by fastening the moving parts to the servo motors through the guides and springs. To prove the adequacy of the proposed design solutions, the modeling of the main structural elements using CAE ANSYS was carried out, which confirmed that the designed parts meet the requirements for the zoomorphic robot.*

**Ключевые слова:** бионика, робототехника, моделирование, опорно-двигательная система, зооморфный робот.

### Введение

Одним из перспективных направлений развития робототехники является создание бионических роботов – это роботы, создаваемые на основе идей заимствованных у природы, либо внешне подобных живым организмам, например, животным, таких роботов называют зооморфными.

Ведущие компании в отрасли робототехники: (Festo: BionicKangaroo [1], BionicCobot [2], BionicANTs [3], SmartBird [4], Boston Dynamics и их прототипы SpotMini [5], WildCat [6]) занимаются бионическими исследованиями и выпускают образцы таких роботов. Эти компании показывают актуальность исследований, внедряя таких роботов в различные сферы деятельности (промышленности, военно-космическом комплексе, и.т.д) и необходимость развития робототехники в данном ключе в будущем.

Бионические исследования дают возможность создания роботов с сохранением динамических характеристик движения, которые приближены к реальным прототипам живых объектов. Для этого необходимо применение знаний о строении костно-мышечной системы. Применение подобной организации позволяет добиваться плавных, пластичных движений, минимизировать шум при передвижении робота, дать возможность развивать большую скорость и передвигаться по труднопреодолимой пересеченной местности.

Целью данной статьи является создание структурной схемы зооморфного робота на основе анализа костно-мышечной структуры бионического образца семейства кошачьих. Основываясь на данной схеме, полученных знаниях разработать детализированную 3D модель (CAD SolidWorks) конечностей зооморфного робота и проведение моделирования нагрузки в САЕ ANSYS для проверки адекватности предложенной конструкции. На базе данных исследований будет разработан зооморфный робот с системой очувствления под управлением Raspberry PI 3 model B [7] или LattePanda [8] которая даст возможность создания имитации поведения с использованием искусственного интеллекта.

### Схема размещения двигателей зооморфного робота

Основываясь на анализе опорно-двигательной системы бионического образца семейства кошачьих [9], предложена следующая упрощенная блочная схема размещения серводвигателей, представленная на рисунке 1.

Как видно из рисунка, опорно-двигательная система разбита на три части:

-блок А: осуществляет движение головы в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью сервоприводов  $M_1$  и  $M_2$ . Для данных целей предлагается использовать Power HD HD-1711MG (Metal Gear) [10] который оснащен металлическим редуктором и обладает достаточным усилием на валу, что позволяет в «голове» разместить набор датчиков ориентирования и веб-камеру;

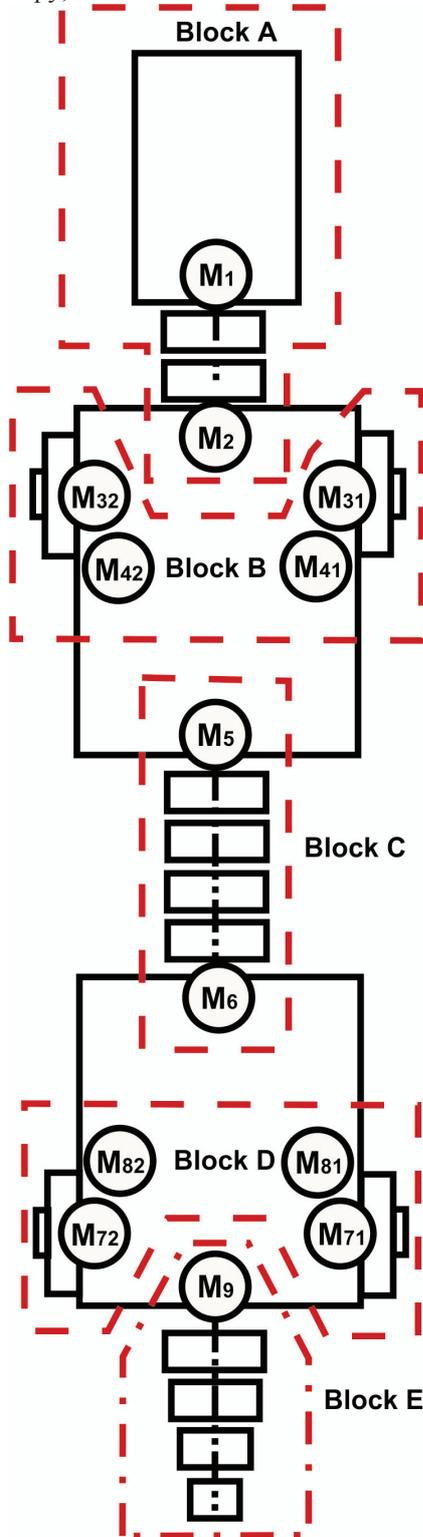


Рис. 1. Упрощенная блочная схема размещения серводвигателей (вид сверху).

- блок В: осуществляет движение переднего плечевого пояса. Реализован с помощью четырех серводвигателей:  $M_{31} \leftrightarrow M_{41}$  и  $M_{32} \leftrightarrow M_{42}$ , которые работают во взаимосвязи друг с другом, с использованием пружинных механизмов, которые реализуют функции трицепса – подъем и опускание локтевого плеча ( $M_{41}$  и  $M_{42}$ ), функции дельтовидной мышцы (поворот плеча) выполняются серводвигателями  $M_{31}$  и  $M_{32}$ ;

- блок С: реализует функции позвоночника. Серводвигатели  $M_5$  и  $M_6$  дают возможность поворота позвоночника в горизонтальной плоскости, соединение двигателей будет реализовано через подвижные блоки, в середине которых будет протянут трос с пружинным соединением. Данное конструкторское решение позволит соединить блок В и блок D зооморфного робота и реализовать плавные повороты робота;

- блок D: реализует функции заднего пояса (тазового), аналогичен переднему плечевому поясу с отличием лишь в длине звеньев. Двигатели  $M_{71} \leftrightarrow M_{81}$  и  $M_{72} \leftrightarrow M_{82}$  работают аналогично  $M_{31} \leftrightarrow M_{41}$  и  $M_{32} \leftrightarrow M_{42}$ .

- блок E: реализует хвост зооморфного робота. Сам хвост будет содержать несколько звеньев (4-6) которые между собой будут соединены свободным креплением и для имитаций опускания или поднятия будет использоваться нить. Двигатель  $M_9$  будет управлять движением в вертикальной плоскости.

Стоит отметить, что данное решение позволит обеспечить максимальные степени свободы основным частям проектируемого зооморфного робота.

Исходя из предложенной упрощенной схемы, представленной на рисунке 1 и кинематической схемы [11] разработана детализированная 3D модель сборки передней и задней конечности зооморфного робота с учетом ее антропологических особенностей (рис.2).

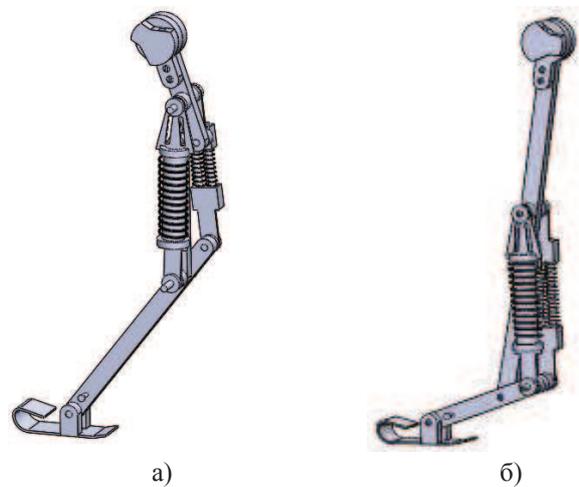


Рис. 2. 3D сборка конечностей зооморфного робота. а) передняя; б) задняя

Для обеспечения устойчивости и свободы движения конечностей в данной конструкции предлагается использовать плоскостную пружину кручения в области «лап», которая обеспечит степень свободы перемещения в вертикальной плоскости и выступит устройством демпфирования при возникновении нагрузки с ограничением на сжатие.

**Анализ несущей способности деталей конечностей зооморфного робота.**

Анализ несущей способности детали и, следовательно, подтверждения адекватности выбранных размеров, проводится для каждого звена отдельно, предельным значением будет минимальное значение нагрузки, полученное в результате моделирования, при котором наблюдается разрушение материала.

Деталь в данном случае будет рассматриваться в условиях статического нагружения (рассматривается давление веса конструкции на детали). Расчет деталей в таких условиях сводится к определению предельных нагрузок (по разрушению, по перемещению или по деформациям)[11].

Результаты моделирования сравниваются с пределом текучести материала детали. В данном случае, детали будут напечатаны на 3D-принтере, материал детали – ABS пластик. Предел текучести такого пластика при температуре 23°C составляет 34-52 МПа [12].

Для проверки несущей способности звена оно рассматривается как консольная балка, жестко закрепленная на одном конце и нагруженная силой F на другом [13].

Этапы анализа:

1. Детали, построенные в CAD SolidWorks импортируются в CAE ANSYS, анализ проводится с использованием анализа МКЭ (метод конечных элементов). Результат разбиения на конечные элементы основных несущих элементов конструкций конечности зооморфного робота представлен на рисунке 3. Шаг сетки равен 0,5 мм.

Так же, на этом этапе задаются свойства материала, из которого выполнена деталь. Значения основных характеристик ABS пластика, использованные при моделировании, приведены в табл.1:

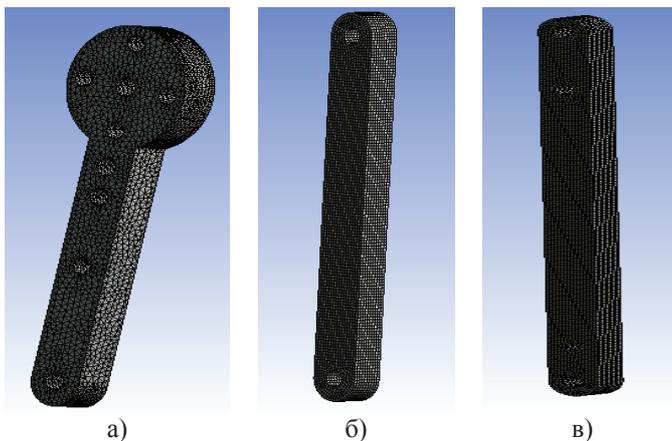
Таблица 1

Основные характеристики ABS пластика

Свойство	Значение	Единицы
Плотность	1040	кг·м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	2.6E+09	Па
Коэффициент Пуассона	0.35	
Модуль объемной упругости	2.8889E+9	Па
Модуль сдвига	9.6296E+08	Па

2) Задаются настройки анализа (рис. 4). В нижней грани детали задаются ограничения по перемещению (по X, Y, Z), на верхнюю грань прикладывается сила F. Значение F увеличивается до тех пор, пока эквивалентное напряжение в детали не достигнет порога предела

текучести материала (т.е. до начала «разрушений»). Промоделированные значения силы F, действующей на детали, и возникающие при этих значениях эквивалентные нагрузки приведены в табл. 2



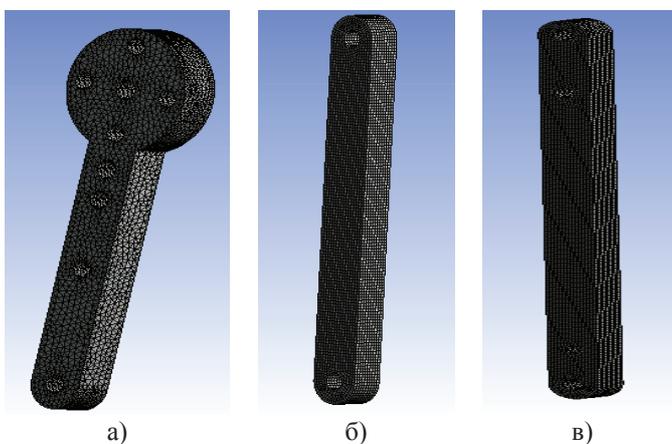
а) плеча; б) средней кости; в) предплечья;

Рис. 3. Результат разбиения на конечные элементы поверхности деталей

Таблица 2

Данные моделирования

Деталь	Сила, Н	Максимальное эквивалентное напряжение, МПа
Плечо	100	13,996
	150	20,994
	250	34,991
Средняя кость	100	13,786
	150	20,68
	250	34,446
Предплечье	100	13,833
	150	20,75
	200	34,583

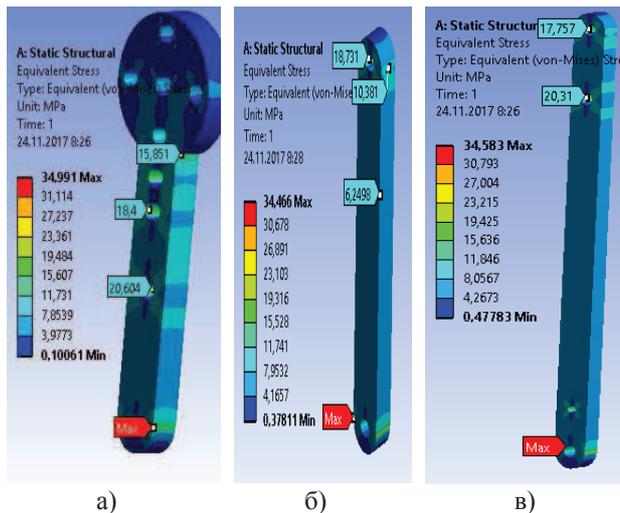


а) плечо; б) средняя кость; в) предплечье;

Рис. 4. Задание настроек анализа

Экспериментально установлено, что значение напряжений, превышающее предел текучести материала, наблюдается при приложении силы  $F=250$  Н. Результаты моделирования при воздействии такой нагрузки приведены на рис.5.

Исходя из полученных значений моделирования, можно сделать вывод, что предлагаемая конструкция и предложенные габаритные размеры плеча, средней кости и предплечья, а также выбранный материал полностью удовлетворяют требованиям по запасу прочности и долговечности разрабатываемой конструкции.



а) плечо; б) средняя кость; в) предплечье;

Рис. 5. Результаты моделирования при  $F=250$  Н

### Выводы

В данной статье предложена упрощенная блочная схема размещения серводвигателей для зооморфного робота, бионическим прототипом которого является животное семейства кошачьих. Особенностью данной конструкции является то, что система передвижения робота реализована по типу «шагающей платформы» сконструированной по примеру опорно-двигательной системы семейства кошачьих. Решение, примененное для реализации двигательных функций (система двигателей и пружин) позволит повысить скорость передвижения робота, обеспечить плавность хода, а так же повысить проходимость робота в условиях передвижения по пересеченной местности. В ходе проведенной работы построена 3D модель передней и задней конечностей. При конструировании было принято решение вынести серводвигатель, который обычно размещается в коленном суставе шагающих роботов в корпус, а взаимосвязь между подвижным звеном и двигателем обеспечить с помощью системы стальных тросов и пружин.

Для полученной модели передней ноги было проведено моделирование, которое показало, что данная конструкция удовлетворяет требованиям по нагрузке и долговечности разрабатываемой конструкции (расчетная масса конструкции в несколько раз меньше допустимой, которая составляет  $\approx 25$  кг).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. BionicKangaroo. Energy-efficient jump kinematics based on a natural model <https://www.festo.com/group/ru/cms/10219.htm>
2. BionicCobot/Festo Corporate <https://www.festo.com/group/ru/cms/12746.htm>
3. BionicANTs. Cooperative behaviour based on natural mode <https://www.festo.com/group/ru/cms/10157.htm>
4. SmartBird/Festo Corporate <https://www.festo.com/group/ru/cms/10238.htm>
5. SpotMini. Good Things Come in Small Packages <https://www.bostondynamics.com/spot-mini>
6. WildCat. The World's Fastest Quadruped Robot <https://www.bostondynamics.com/wildcat>
7. The Raspberry Pi 3 is the third-generation Raspberry Pi. It replaced the Raspberry Pi 2 Model B in February 2016. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
8. LattePanda 2G/32GB (Activated) <http://www.lattepanda.com/products/2.html>
9. Cat Skeleton: Do You Know how it Looks Like? <https://www.dogalize.com/2017/10/know-cat-skeleton-looks-like/>
10. HD-1711MG [https://www.pololu.com/file/download/HD-1711MG.pdf?file\\_id=0J1162](https://www.pololu.com/file/download/HD-1711MG.pdf?file_id=0J1162)
11. V.Yevsieiev Development of kinematic Scheme for Zoomorphic Robot Leg Based on a Bionic Analysis of the Musculoskeletal System [Text] / V.Yevsieiev, V.Saliieva, K.Maksymenko, // IV Міжнародна науково-технічна Інтернет-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2017 р. – 295 с. – Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>
11. Благосклонова Н.Ю. Справочник машиностроения, том 3Н.Ю. Благосклонова, А. И. Евстратъев [Текст] – Л: «Печатный двор», 1963 г. – 621 с.
12. Полиамид получение свойства показатели характеристики аналоги [http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials\\_ABS.html](http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_ABS.html)
13. Кинасошвили П.С. Сопротивление материалов. Краткий учебник. П.С. Кинасошвили [Текст] –М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960 г. – 358с.
14. Гийо Агнес Бионика: как наука имитирует природу / Агнес Гийо, Жан-Аркади Мейе. – Москва: Техносфера, 2013.- 280 с.
15. D.J. Todd Walking machines: an introduction to legged robots / Todd, D.J. – Great Britain: Anchor Press Ltd, 1985.-185 p.
16. Решодько Л.В. Бионика. Биологические аспекты / Л.В. Бурдо. – Киев «Вища школа», 1978, 304 с.