



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Факултет Машиностроителен
Катедра Автоматизация на дискретното производство

Маг. инж. Борис Пламенов Петров

**КРАК С АДАПТИВНО СЪПАЛО ЗА РОБОТ АНАЛОГ НА
ГУЩЕР**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. "Машинно инженерство"

Научна специалност: 02.21.08 Автоматизация на производството

**Научен ръководител: проф. д-р. инж. Иво Малаков, проф. д-р. инж.
Веселин Павлов**

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Автоматизация на дискретното производство“ към Факултет Машиностроителен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 13.11.2017 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 08.03.2018 г. от 13,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-352 / 04.12.2017 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р. инж. Стилян Николов Николов – председател
2. проф. д-р. Иво Кръстев Малаков – научен секретар
3. проф. дтн. Христо Константинов Шехтов
4. проф. д-р. Роман Захариев Захариев
5. доц. д-р. инж. Иван Николов Чавдаров

Рецензенти:

1. доц. д-р. инж. Стилян Николов Николов
2. проф. д.т.н. инж. Христо Константинов Шехтов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Машиностроителен на ТУ-София, блок №3, кабинет № 3242.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Автоматизация на дискретното производство“ на факултет Машиностроителен.

Автор: маг. инж. Борис Петров

Заглавие: Крак с адаптивно стъпало за робот аналог на гущер

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД ¹

Актуалност на проблема

В съвременното си човечеството е свидетел на значителен прогрес и масово въвеждане на технологиите в ежедневието на хората. Автоматизацията е навлезнала с пълна сила, освен във високотехнологичните производства, транспортните средства, системите за регулиране на трафика, комуникациите, военната промишленост, така и в нашите домове. Непрекъснатият стремеж за подобряване, улесняване и обезопасяване на ежедневието, довежда до появата и внедряването на все по-впечатляващи изобретения. Първоначално бойните изстребители са се превърнали в сателитно управлявани роботи – дрони, а в последствие технологията достига до нива и цени, така че звената на гражданска защита, пожарна и полиция да разполагат с подобно оборудване, за лесно, бързо и икономично заснемане на рискови, обекти, природни бедствия и преследвания. След тях малките и средни предприятия започват да ги използват за геодезически заснемания, охрана и филмово изкуство. Екзоскелети и роботи, аналози на живи организми за пренос на храна, медикаменти и боеприпаси преобръщат разбиранята за военната индустрия. И въпреки че технологиите позволяват на автомобилите да паркират сами, да следят пътната маркировка, да се появят хибридни, изцяло електрически, а сега и автомобили с водородна клетка, то какъвто и автомобил да притежаваме, има терени, и дестинации, на които те не могат да заведат човека, за разлика от неговите крака и ръце. Придвижването с автомобил през саваните, по непознат терен със скорост 120 км/ч. – е по-скоро трудно, докато спокойно може да се каже, че това е част от битието на гепардите. Ускорението, което достига гепарда е от 0 до 110 km/h за 3 секунди – по-бързо от повечето спортни супер автомобили[24]. Достатъчно впечатляващо е, че този хищник, макар да не обича водата може да плува, а също така да се катери по скали, за да разбере предимството на двигателните системи на живите организми.

Тези предимства правят особено интересна задачата да бъдат проектирани роботи аналози на живи организми от различни типове, които могат да намерят различни приложения в рискови среди, като терени с големи амплитуди в релефа, терени след природни катаклизми, терористични атаки, терени с химически и радиационни замърсявания, места по време на пожари, минни полета и други, където да се рискуват, човешки животи би било неразумно.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Разработване на идеен проект на крак с адаптивно стъпало наподобяващо живият образец, като размерите и работната зона са съобразени с въграждане в робот с габарити: 200 mm x 300 mm x 500 mm, като общият брой на активните степени на свобода на всеки крак е 3, а адаптивното стъпало е с достатъчни пасивни и поне една активна степени на свобода. За изпълнение на поставената цел трябва да се решат следните задачи:

1. Да се направи Структурен синтез и анализ на крак и адаптивно стъпало, който да включва множество от възможни решения (поне три), и направи мотивиран избор за проектираните варианти.
2. Да се извърши кинематичен и кинетостатичен анализ, чрез решаване на правата и обратна кинематични задачи и да бъдат изведени кинето-статичните сили и моменти в ставите.
3. Да се проектира избраната структура на крак и стъпало с помощта на 3D програми и готови програмни продукти, като се изберат двигатели, сензори и управляващ блок.
4. Да се изработи, чрез 3D технология и направен монтаж на експерименталния модел.

¹ Информацията по тази част е с препоръчителен обем 2-3 страници

5. Да се проведат функционални експерименти и изследвания, включващи симулация и заснети функционални движения.

Научна новост

Получените резултати и авторски претенции в дисертационната работа могат да се използват за подпомагане на конструкторите при проектиране на крака за мобилни роботи, от докторанти и студенти обучаващи се в областта на роботиката. Някои от стойностите могат директно да се използват, а други като стартова позиция за надграждане при конкретни размери и маси на роботите и условията на приложение. Претенциите имат научно-приложен и приложен характер.

Практическа приложимост

1. Направен е и систематизиран обзоре анализ на биологични скелетни и мускулни системи на крака и стъпала на гущери, както и на съвременни инженерни решения в областта.
2. С помощта на специализиран софтуер за управление и в съавторство с докторантът маг. инж. Н. Димитров, са разработени компютърни алгоритми, с чиято помощ прототипът на робота гущер може да се движи и да се провеждат експериментални изследвания

Апробация

Създадени са реални прототипи на две структури на крака за роботи на гущери, като едната от тях е интегрирана в робот аналог на гущер. Проведени са както софтуерни, така и тестове на реалния обект. Направени са подобрения по структурата на крака, на база на резултатите от тестовете. Чрез допълнително тестване при ходене на целият робот, могат да се открият допълнителни полета за оптимизация и създадени подобрени структури на крака и съответно роботи.

Част от получените резултати са поместени в 6 публикации.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 6 на брой научни статии, от които 1 брой самостоятелни:

1. Петров Б., Павлов В., „Синтез на крака с три активни и три пасивни степени на свобода за мобилен робот аналог на гущер“ „Механика на машините“ 2010 г., XVIII, книга 7, стр. 18-23, ISSN 0861-9727
2. Павлов В., Петров Б., Ханджиев, Й., Димитров Н., „3D структура на мобилен робот изградена върху биомеханична аналогия със скелетна система на гущер“; „Сборник доклади от XX Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2011“, Созопол - юни 2011
3. Павлов В., Петров Б., Димитров Н., „Моделиране на контактно взаимодействие между опорната равнина и стъпалото на крачещ робот, съдържащо пасивни степени на свобода“; „Механика на машините“ 2012 г., година XX, книга 3, стр. 37-43, ISSN 0861-9727
4. Петров Б., Павлов В., „Обзор и анализ на инженерни решения на крака на роботи аналози на живи организми“, „Сборник доклади от XXII Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2013“, Созопол - юни 2013

5. Павлов В., Димитров Н., Петров Б., „Равнинни модели за движение на робот с четири крака, съдържащ гръбначен стълб с еластични шарнири“, „Сборник доклади от XXIV МНТК-АДП 2015, Созопол, 2015
6. Петров Б., „Инженерни решения на стъпала при мобилни роботи аналози на гущери. Моделиране на Активно-пасивно задвижвано стъпало, част от робот аналог на гущер,“ ; „Българско списание за инженерно проектиране“ ISSN 1313-7530, брой 33, 2017

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **165** страници, като включва увод, **5** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **60** литературни източници, като **11** са на латиница и **12** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **145** фигури и **14** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪКРАТЕНО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

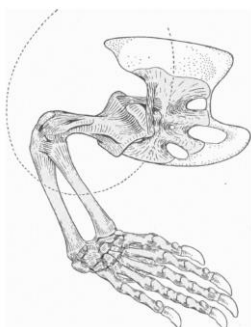
ГЛАВА 1. ОБЗОРЕН АНАЛИЗ НА РЕШЕНИ И НЕРЕШЕНИ ПРОБЛЕМИ ПРИ КРАКА И СТЬПАЛА НА РОБОТИ ТИП „ГУЩЕР“

1.2. Мотиви за търсене на аналогия с биологични видове

Проектирането на роботи аналози на живи организми изисква сериозен анализ на живия обект, за да се разберат структурата стояща зад моториката и възможностите на биологичният образец. Особено важни са функционалните задачи, които се възлагат на робота и как тези задачи се изпълняват от живия аналог в структурно, кинематично, и поведенческо отношение. В настоящият под раздел са разгледани анатомията и кинематичното движение на краката на гущери, и в детайли функциите на природни образци.

1.2.1. Ставно – скелетна система при крака и стъпала на гущери.

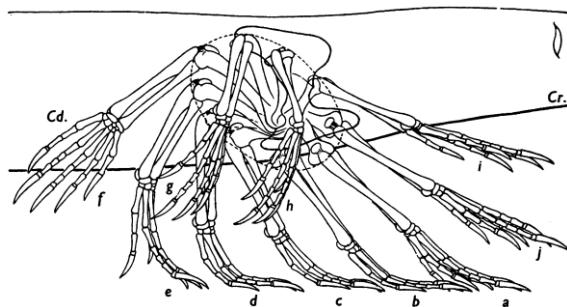
1.2.1.1. Раменна структура



Фиг.1.5.Скелетна структура на преден крак на воден Varanus salvator в естествена поза.[10]

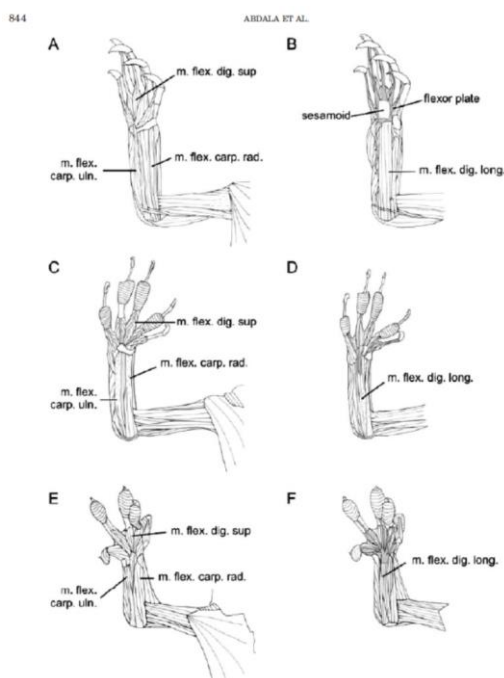
Раменната става на влечугите се характеризира от наличието на два чифта кръстосани ставни връзки, една вентрална и една дорзална спрямо ставата, чиито позиции и действия са описани в подробности. Раменната кост описва приблизително кръгова траектория и може да се върти около собствената си надлъжна ос. Както и при други влечуги и амфибии раменната кост бива прибирана и завъртана по време на двигателната фаза от крачката, докато лакътят първо се сгъва и след това разгъва. Във възстановителната фаза крайникът се плъзга напред с лакътя леко сгънат, докато ротацията се обръща. Ставите са изградени от

хрущяли и сухожилия захващащи съседните основно кости в кръстосана връзка и позволяващи ротация от порядъка на 180° , като работната зона на целият крак образува приблизително полусфера. Приблизително половината от теглото на всеки от гущерите е мускули. При ходене по цилиндрична повърхност винаги първо дланта докосва повърхнината, а чак след това контакт правят и пръстите. Ориентацията на пръстите на стъпалото по време на движение при почти всички видове гущери е средно ъгъл от 150° в посока вън от тялото. [10]



Фиг.1.10. Скелетна структура на предния крак на *Varanus griseus*, показваща движенията в пълна стъпка. [10]

1.2.1.2. Структура при стъпалото



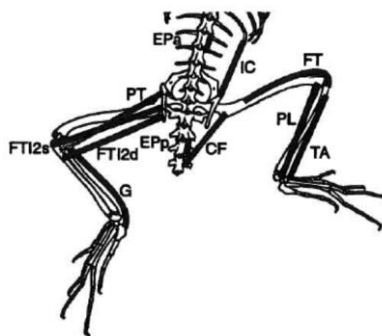
Фиг.1.12. Повърхностни (A,C,E) и дълбоки (B,D,F) изгледи на сгъващите мускули на предмишницата на *Pogona vitticeps* (A,B), *Anolis equestris* (C, D), и *Gekko gecko* (E,F). [20]

При изкуствено стимулиране на мускул *m. flexor digitorum* китката се сгъва между 120° и 140° . Силата на захващане на стъпалото при различните изследвани по-горе гущери достига до 1.6 N. Тези сили дават възможност на гущерите да ходят по цилиндрични обекти, но спомагат и са много важни и за ходенето по наклонени повърхности. [20]

1.2.2. Двигателно-мускулна система при гущери

Задният крак е смятан за източник на двигателната сила в движението на гущера. В изследване – [18] са разгледани, чрез Количествената електромиография и кинематичния анализ моторните функции (поведение) на 11 мускула на задния крак използвани по време на

четирикрако тичане при гущер *Sceloporus clarki*. Разгледани са девет последователни крачки, по време на които гущерът тича със скорост 0.83 [m/s]. [18]



Фиг.1.18. Схематична диаграма на мускулите на задния крак изучавани при *Sceloporus clarki*. [18]

Мускулите работят на принципа на съкращаване (линейно свиване), и отпускане (линейно разширяване), като краищата им са свързани с сухожилията задвижващи костните системи. За нуждите на ходенето и тичането гущерите използват поне: 5 бедрени мускула, 3 мускула на подбедрицата (като два от тях директно отговарят за свиването на ходилото). Това е броят на мускулите на единият от четирите крака. По време на ходене, четирите крака участват активни, независимо, кой крак в коя фаза е. Времената за тласкаща фаза (стъпил крак) и люлееща фаза (преместване на крак) са приблизително равни.

Пръстите от 1 до 4 на ходилото сочат на 45° в страни от посоката на движение. Същите не се завъртат по време на тласкащата фаза, следователно ходило движи гущера в посока 45° от посоката на движение. В походките на гущерите, аксиалните мускули (огъването на тялото) играе неделима част от движението, като по време на различните походки се активират поне още три аксиални мускула от страни на тялото, спомагащи за огъването му. Кракът не се разгъва напълно, в която и да е от фазите при тичане. Стъпалото стъпва на земята, или първо с петата ($n=4$) или като цяло (стъпалоходно, $n=5$). А при тласкаща фаза с протягането на стъпалото цялата двигателна сила на крайника се прехвърля на ноктите.

1.3. Системно представяне на известните решения на крак и стъпала

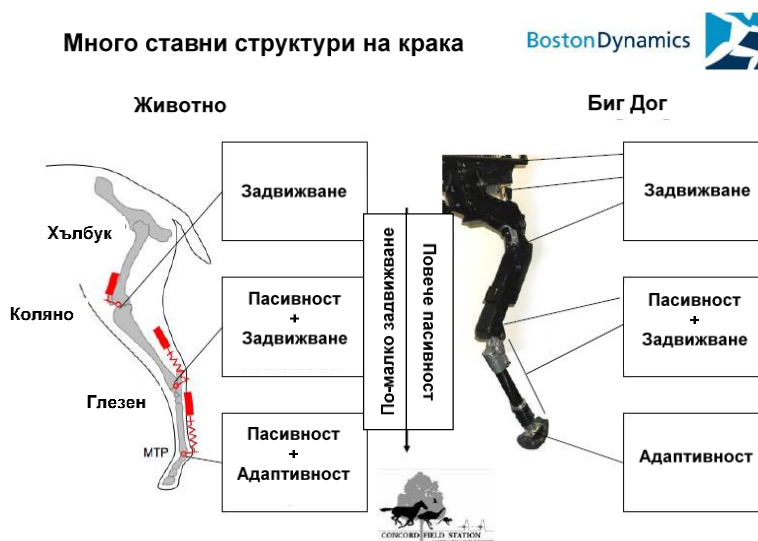
Разгледани са прототипи на роботи аналози на живи организми - уникални с различните си предназначения и структури, е трудно да бъдат сравнени под общ знаменател. В таблица 1.6 е опитано да обобщим основните им характеристики и разлики

	Биг Дог	Хексапод	Стики Бот	Хуманоид	Плуробот
Активни в крака	3	6	3	11	4
Пасивни в крака	1	1	0	0	1
Активно-пасивни в стъпалото	0	0	0	4	0
Активни в стъпалото	0	0	1	4	0
Вид задвижване	Хидравлично	Пневматично	Електрическо	Електрическо	Електрическо

Таблица 1.6. Сравнение при разгледаните разработки на живи организми спрямо видове степени на свобода и задвижвания в крака и стъпалото

В таблицата се вижда, че в зависимост от предназначението, учените са успели да решат много проблеми в разработката на автономни и почти автономни роботи аналози на живи организми. Разгледани са разработка по разработка, за да може да се извади есенцията на решените и нерешени проблеми при всеки от видовете, с уточнението, че посочените нерешени проблеми от настоящата труд може да не са били цел на, която и да е от разработките, както и да не пречат на нейното приложение, съгласно идеите на авторите им. Посочването на нерешените проблеми е субективно, като е търсено до каква степен разработките са копирали свършените на този етап структури предлагани от живите организми:

1.1.1. Биг Дог



Фиг.1.25. Сравнение между модела в природата и разработения робот.

Биг Дог е разработен с цел да бъде военен транспортен робот. Основните цели в неговата разработка са: Автономност, стабилност и възможност за преодоляване на недефиниран терен с товар.

Решени проблеми:

- Роботът се придвижва без оператор на борда, чрез радио управление, система от камери.
- Интегрираната жирокопичната система за контрол на движението и реакция при външни смущения, бързите, и точни актуатори, както и софтуерното управление демонстрират едно от най-добрите нива на динамична стабилност на робот аналог на жив организъм.
- Дългите и гъвкави крака позволяват лесно преодоляване на препятствия и преминаване през наклонени и неравни терени.

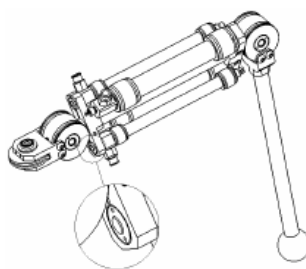
Нерешени проблеми:

- Зависимост на обсега на работа от наличното гориво в робота (източник на двигателната сила е ДВГ) и необходимост от допълване от страна на оператор.

- *Опростена структура на стъпало – точков или линеен контакт при стъпване, създаващ предпоставки за заклецоване на крак при подхлъзване, между камъни, при динамичното им разместване.*

1.1.2. Хексапод

Хексаподната структура се е опитала да копира максимално принципите използвани в природата, касаещи строежа и функцията на мускулите. Данните за приложението и тестовете на системата за съжаление, не са толкова общодостъпни както информацията, която може да се намери за част от другите разработки и следователно коментарът за тази система не може да бъде изчерпателен.



Фиг.1.28.Крак на робота хексапод задвижван, чрез пневматични мускули.[2]

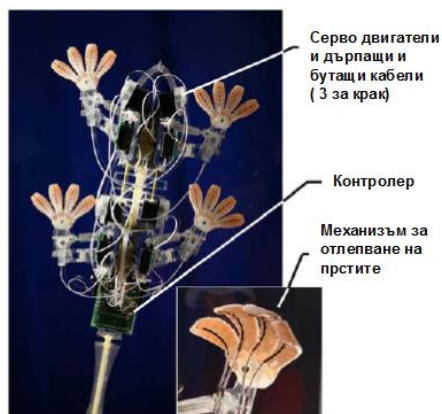
Решени проблеми:

- *Инкорпориране на пневматичните мускули в цялостна структура на робот, позволяваща ротационно движение на краката в три равнини.*

Нерешени проблеми:

- *Може да се счита нуждата от някакъв вид компресорно устройство осигуряващо сгъстен въздух, за да могат мускулите да работят в посока съкращаване и съответно изпускане на въздуха. Това би ограничило обсега на автономно придвижване на прототипа на по-големи разстояния поради зависимостта си от своето хранване.*
- *Не е потърсено разработка на усложнено стъпало, а е използван точков контакт с повърхността*

1.1.3. Стики Бот



Фиг.1.29. "Stickybot"[13]

Разработката СтикиБот е целяла да осигури придвижване по гладка вертикална повърхност.

Решени проблеми

- Успешно копиране на насочената адхезия от природните образци в разработката на стъпало при работа.
- Малки размери и ниско тегло.

Нерешени проблеми:

- Невъзможност за преминаване през препятствия (катерене само по гладки повърхности)
- Зависим от външен източник на захранване.

1.1.4. Хуманоид

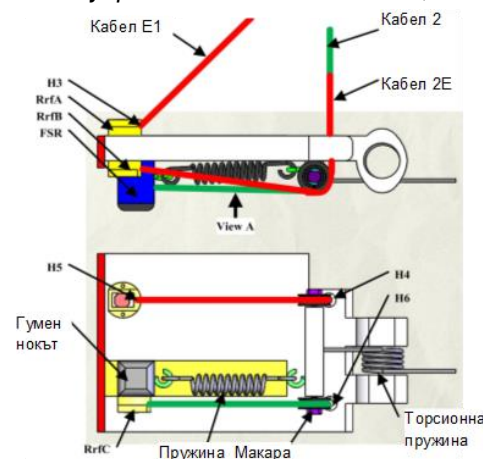
За цялостната структура на хуманоидния робот е известно твърде малко и следователно изводите, които ще се направят ще са на база на наличната информацията:

Решени проблеми:

- Интегриране на адаптивно стъпало комбиниращо активно-пасивни степени на свобода.
- Постигане на динамична стабилност при двукрако ходене в симулационния модел

Нерешени проблеми:

- Голям брой активни степени на свобода (3 в крака и поне 10 в стъпалото (за единият крак)), които увеличават сложността на управление на системата, както и енергоемкостта ѝ.



Фиг. 1.38. Кабелно свързване в предно дясно стъпало. [21]

1.1.5. Плуробот



Фиг. 1.48. Plurobot [23]

Решени проблеми:

- Постигната максимална близост до живият образец относно интегриране на гъвкав гръбначен стълб и балансираща опашка в структура с четири крака.
- Интегриране на сензорна система в главата и батерии осигуряващи автономност на движението

Нерешени проблеми:

- Адаптивно усложнено стъпало, копиращо природния образец;
- Голям брой активни степени на свобода(27) увеличаващи енергоемкостта на работа.

1.1.6. Обобщение

Съвременните разработки решават все повече и повече проблеми свързани с ефективното копиране на природните образци в механични прототипи. Достигат се невиджани до този момент нива на стабилност, маневреност и бързодействие. Все още остават някои области които остават проблемни и това са:

- Създаването на усложнено стъпало, копиращо природния образец, което да даде предимства при ходене, катерене и преминаване през препятствия.
- Постигане на дълго работно време посредством намаляване броя на консуматорите (актуатори, сензори и др.) и търсене на самозареждащи се модули

ГЛАВА 2. СТРУКТУРЕН СИНТЕЗ И АНАЛИЗ НА КРАК И СТЬПАЛО

В настоящата глава са разгледани множеството от варианти за синтезиране на структура на крака с три и по-малко активни степени на свобода, които могат да се вградят в структура на робот, с описаните по-горе параметри. На база на сравнителен анализ, са избрани две от разгледаните структури, доближаващи се най-много до изискванията на заданието.

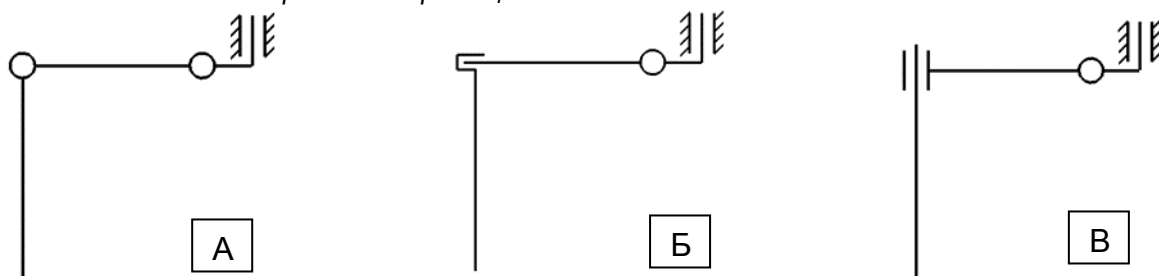
2.1. Множество на възможните решения – равнинни и пространствени

Използвайки направеният биологичен и технически обзор, ще се търси решение на крак, който да се интегрира в робот аналог на гушер варан, отговарящо на всички предизвикателства, които устройството на робота предлага. Структури, които не биха дали: Автономност, Статична стабилност при походка: два крака на земя - два крака във въздуха, запазване на стабилност при извиване на гръбначния стълб и опашката, стабилност при ходене по недефиниран терен, общо три активни степени на свобода в целият крак, походка поддържаща тялото на робота (глава, гръбнак, опашка) във въздуха (без допир до повърхността на земята), или такива, които предлагат: нецелесъобразни(паразитни) или конфликтни движения, ще бъдат отхвърляни аргументирано преди да се отсеят финалните решения.

2.1.1. Видове конфигурации на основната структура

Взимайки под внимание всички изисквания, разработката се насочва към основна структура от три елемента – Рамо, като връзка между скелета на робота и крака, Бедро, свързващо рамото и подбедрицата, и самата подбедрица. Бедрото и Подбедрицата ще са линейни звена с крайни дължини. С цел свързаните изисквания: лекота, автономност и енергоефективност на конструкцията, разработката е ориентирана към реализация с ротационни актуатори. Въпреки че в живият модел движенията се осъществяват посредством съкращаване на линейни

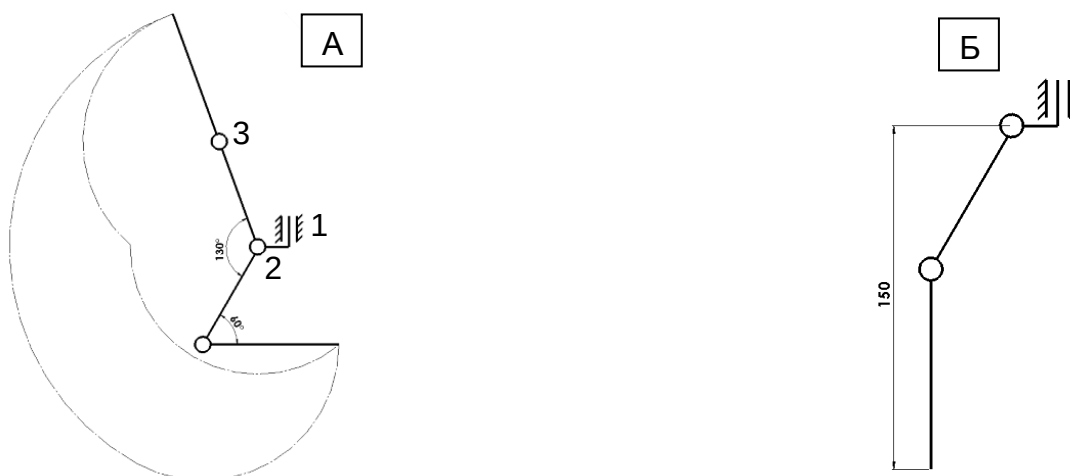
мускули, то крайният ефект е ротация на един елемент, спрямо друг. Използването на пневматични мускули, което най-много доближава изкуственият до живият образец, ще създаде необходимост от наличие на спомагателни системи за сгъстен въздух или друг флуид, което значително би намалило възможността роботът да се движи самостоятелно. Следвайки живият модел и заданието, целта на кракът е да може да се вдигне от земята и да се премести в посока напред (посока на движение на робота), след което отново да стъпи. С оглед да бъде постигнато горното ще е необходима една ротация, която повдига целия крак (бедро и подбедрица) от земната повърхност и се стреми да ги постави в максимална близост до рамото, и още една ротация в рамото, която завърта целия крак около Ос перпендикулярна на земната повърхност в посока напред (посока на движение на робота). Тези две ротации са фиксирани като задължителни и от тук насетне са разгледани 3 структури, показващи различните възможни варианти на ротации в коляното – Фиг.2.1



Фиг.2.1. Основни структури на крака. А) Структура А, Б) Структура Б, В) Структура В;

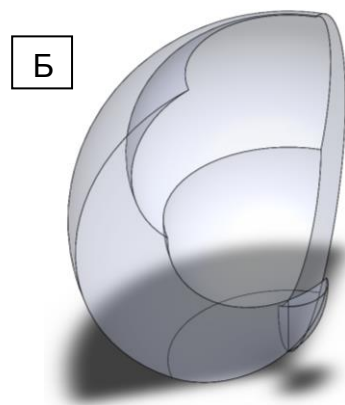
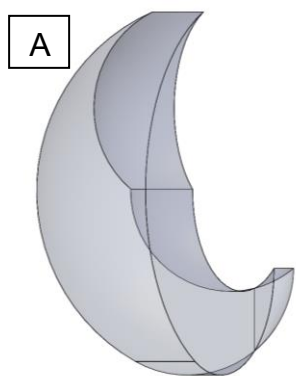
Сравнени са работните зони на структурите, така че да се видят техните предимства и недостатъци, като е започнато от двуизмерна работна зона и в последствие е развита триизмерната:

Основна Структура А:



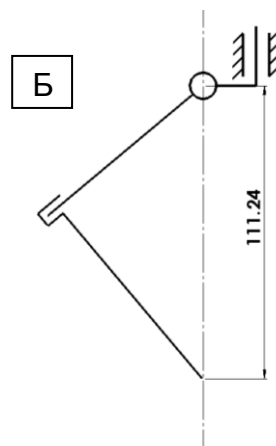
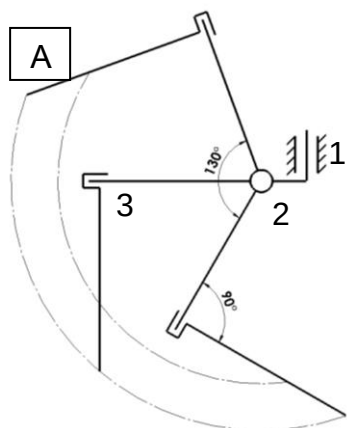
Фиг.2.2. Работна зона на Структура А. А) Изглед от страни Б) Максимална височина на стъпил крак.

Развита е и триизмерната работна зона на база на завъртане в ротация „1“ при завъртане до 120°

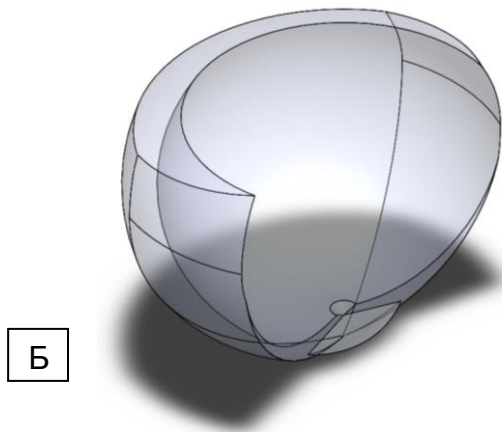
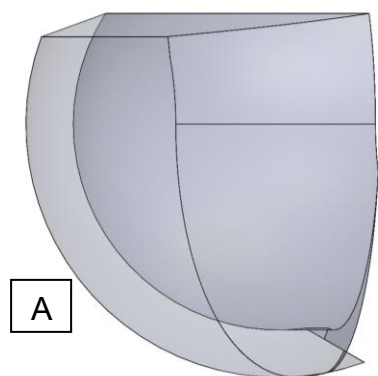


Фиг.2.3.Триизмерна Работна зона на Структура А, при ограничено завъртане на ротация „1“ до 120° А) Изглед отстрани Б) Изометричен изглед.

Основна Структура Б:



Фиг.2.4. Работна зона на Структура Б. А) Изглед отстрани Б) Максимална височина на стъпил крак.



Фиг.2.6. Триизмерна схема на работната зона на Структура Б, при ограничение на завъртането на ротация „1“ (Фиг.2.3.) до 120°. А) Изглед от страни Б) Изометричен изглед;

Основна Структура В:



Фиг.2.7. Работна зона на Структура В. А) Изглед от страни Б) Максимална височина на стъпил крак.



Фиг.2.8. Триизмерна схема на работната зона на Структура В, при ограничение на завъртането на ротация "1" (Фиг.2.7.) до 120°. А) Изглед от страни Б) Изометричен изглед;

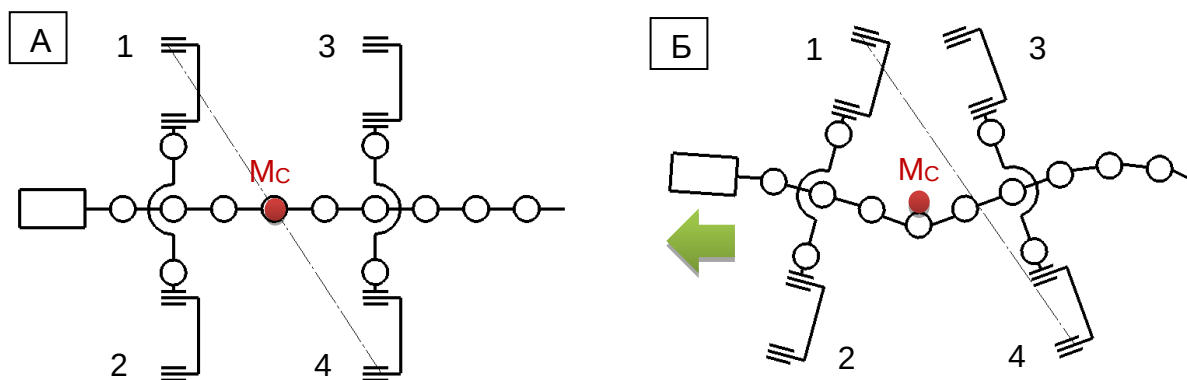
Общото сравнение между основните структури може да бъде видяно по-долу:

- Структура А
 - Най-голяма работна зона на контактната точка (Обем от равнина);
 - Най-голяма височина на вдигане на корпуса на робота от земната повърхност – 150 мм.;
 - Допълнителни възможности за усукване на тялото и промяна на центъра на тежест при четири стъпили крака;
- Структура Б
 - Втора по големина работна зона (Обем от равнина);
 - 38.76 мм, по-малка височина на вдигане на корпуса на робота от земната повърхност от Структура А
 - Допълнителни възможности за усукване на тялото и промяна на центъра на тежест при четири стъпили крака;
- Структура В
 - Трета по големина работна зона (Една повърхнина);
 - 38.76 мм, по-малка височина на вдигане на корпуса на робота от земната повърхност от Структура А
 - Липса на допълнителни възможности за усукване на тялото и промяна на центъра на тежест при четири стъпили крака;

На база на описаните по-горе характеристики за основна структура е избрана Структура А.

2.1.2. Основна структура с точков контакт в стъпалото

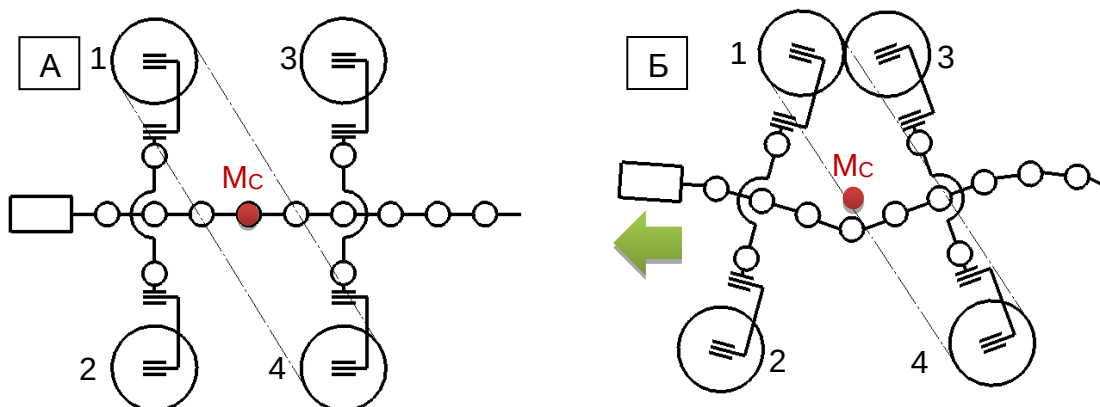
В настоящата раздел е разгледано поведението на робот аналог на гущер с променлива геометрия в тялото при походка с два вдигнати крака и два стъпили на земята. Илюстрирана е промяната в центъра на тежест при движение, положението на многоъгълниците на стабилност и най-вероятната загуба на устойчивост при приложената походка (фиг.2.10). На база на това, че многоъгълникът на стабилност е права линия, и масовият център рядко попада в него, то точковият контакт е отхвърлен като опция в настоящата разработка.



Фиг.2.10. Многоъгълник на статична стабилност при походка 2x2 на робот аналог на гущер с гъвкав гръбначен стълб, където: А). Вдигане на крака 2 и 3 във въздуха, Б) Придвижване на крака 2 и 3 в посока напред, съпроводено с огъване на гръбначен стълб. , **Mc – масов център, **Зелна стрелка** – посока на движение на робота.**

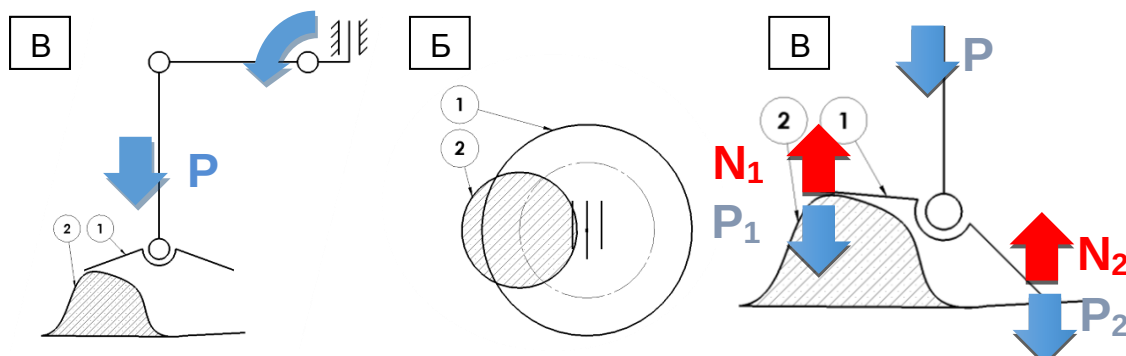
2.1.3. Варианти на основна структура с равнинен или многоточков контакт между пасивно стъпало и земна повърхност

Разгледани са 8 варианта на структури с равнинен или многоточков контакт, като до финални оценяване и разглеждане са допуснати 6. Останалите две структури са аргументирани отстранени, като непригодни да осигурят стабилно движение при разработената конструкция на робота. Всички структури осигуряват статична стабилност при походка с два вдигнати крака и два стъпили на земята (фиг.2.12)

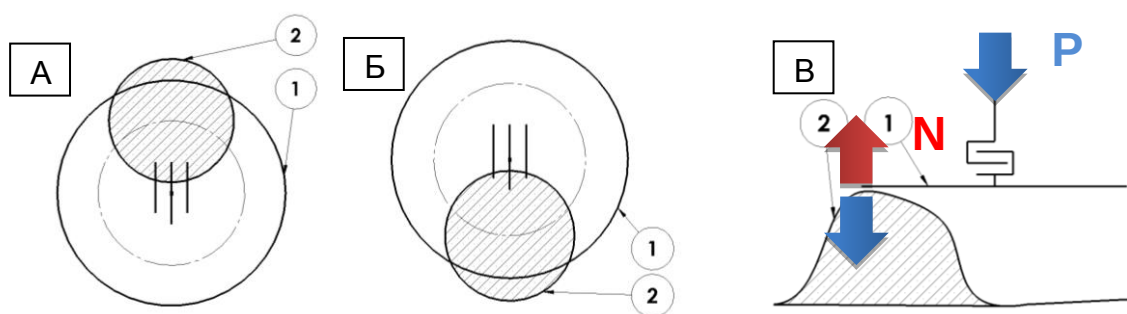


Фиг.2.12. Походка 2 x 2 на робот аналог на гущер с интегрирана структура на крак съдържаща стъпало с равнинен или многоточков контакт с земята. А). Повдигане във въздуха на крака 2 и 3 Б) Ротация в гръбначния стълб и раменният пояс придвижващи крака 2 и 3 в посока напред (посоката на движение на робота), Където **Mc – масов център, **Зелена стрелка** – посока на движение на робота.**

Разгледани са възможностите на структурите за адаптиране към неравни терени и на база на това са оценени като съответно: адаптивни или неадаптивни към съответните терени разгледани в глава 2.1 (фиг.2.14 и 2.16). Това е и един от критериите за финална оценка и избор на структура за изработка.



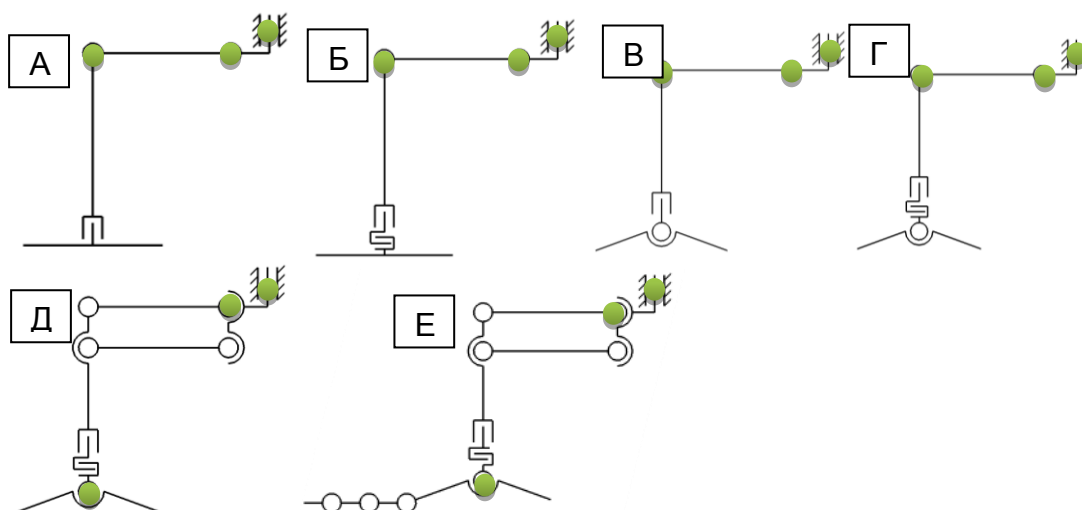
Фиг.2.14. Симулация на стъпване на стъпало с ротация в стъпалото успореден на ротация в коляното А). Стъпване крак – терен, поглед от страни, където „1“ – Стъпало; „2“ – Повдигнатият терен; Б) Стъпване крак – терен, поглед отгоре В) Адаптация на стъпалото при допир с земната повърхност, където P е силата на натиск, а $N_{1,2}$ са реакциите на опорите



Фиг.2.16. Симулация на стъпване с ротация в стъпалото успоредна на ротация в коляното А). Стъпване крак – поглед отгоре при отместено препятствие на 90° , спрямо фиг. 2.11, където „1“ – Стъпало; „2“ – повдигнатият терен; Б) Общ вид на композицията стъпване крак – терен, поглед отгоре при отместване на възвишението на 270° , спрямо фиг. 2.11. В) Адаптация на стъпалото при допир с земната повърхност, където P е силата на натиск упражнена от двигателите в рамото и коляното и N е реакцията на опората.

2.2. Мотивиран избор със заложили очаквани резултати

В предишната глава са разгледани варианти на структури, като не се претендира да са показани всички възможни. Видени са и е маркирано, че всяка една има предимства и недостатъци, други са отхвърлени веднага, поради непригодност да изпълнят заданието, или с ограничени работни зони или функционалности при едни същи брой двигатели, основни звена, и степени на свобода. Отсетите структури за финален анализ са подбрани да отговарят на критерий: съдържание в на въведените в раздел 2.1. „задължителни степени на свобода“. Следвайки този подход за финален избор остават общо 6 броя структури, които за леснота са кръстени, съответно **Структура 1, 2, 3, 4, 5 и 6** – Фиг.2.23



Фиг.2.23. Структурите от раздел 2.1, които съдържат „задължителните степени на свобода“, като разположението на актуаторите е маркирано в зелено А) Структура 1; Б) Структура 2; В) Структура 3; Г) Структура 4; Д) Структура 5; Е) Структура 6;

Сравнението минава през определяне на критерии за избор и прилагане на методът на бинарните сравнения[14] За основни критерии за определени: За избор на оптимален вариант се определят следните критерии: Брой активни степени на свобода (всички структури имат по три активни степени на свобода и поради тази причина, резултатът ще е равен при всички). На тази база критерият е изключен от сравнението и като първи критерий е избран: f_1 – пригодност за изработване; като втори: f_2 - брой пасивни степени на свобода; и трети: f_3 - Възможност за адаптация към терените от Раздел 2.1. В таблица 2.3. са изчислени приоритетите (коефициентите на тежест) на избраните критерии. В последната колона цветовата легенда показва: **Зелен** цвят – най-голям резултат, **червен** цвят – най-малък резултат, бял цвят – резултат между най-малката и най-голямата стойност. В част от таблиците се наблюдават и вариации на червено и зелено, като най-тъмните цветове са респективно най-големите и най-малки стойности, а по-светлите са близки до тях, но все пак са в множеството от стойности между екстремумите.

Како се ова таблица можеу експерименту:						
	f_1	f_2	f_3	$\sum_{j=1}^k a_{ij}$	$\overline{\alpha}_i$	α_i
f_1	$\approx$	$\succ$	$\approx$	2.1	5.57	0.223
	1	0.8	0.3			
f_2	$\prec$	$\approx$	$\prec$	2.8	7.78	0.312
	1.2	1	0.6			
f_3	$\approx$	$\succ$	$\approx$	4.1	11.59	0.465
	1.7	1.4	1			
					24.94	1

Таблица 2.3. Определяне приоритет на критерии за избор на оптимален вариант по метода на бинарните сравнения

		f1	f2	f3	$\sum_{i=1}^k \alpha_i \beta_{ij}$	$\delta_i = \frac{\gamma_i}{\sum \alpha_i \beta_{ij}}$
	α_i	0.223	0.312	0.465		
C1	β_{ji}	0.229	0.244	0.113	0.180	0.180
	$\alpha_i \beta_{ji}$	0.051	0.076	0.053		
C2	β_{ji}	0.193	0.167	0.131	0.156	0.156
	$\alpha_i \beta_{ji}$	0.043	0.052	0.061		
C3	β_{ji}	0.193	0.167	0.131	0.156	0.156
	$\alpha_i \beta_{ji}$	0.043	0.052	0.061		
C4	β_{ji}	0.158	0.088	0.184	0.148	0.148
	$\alpha_i \beta_{ji}$	0.035	0.027	0.086		
C5	β_{ji}	0.122	0.167	0.202	0.173	0.173
	$\alpha_i \beta_{ji}$	0.027	0.052	0.094		
C6	β_{ji}	0.105	0.167	0.238	0.186	0.186
	$\alpha_i \beta_{ji}$	0.023	0.052	0.111		
					1.000	

Таблица 2.7. Определяне на приоритет на вариантите според всички критерии;

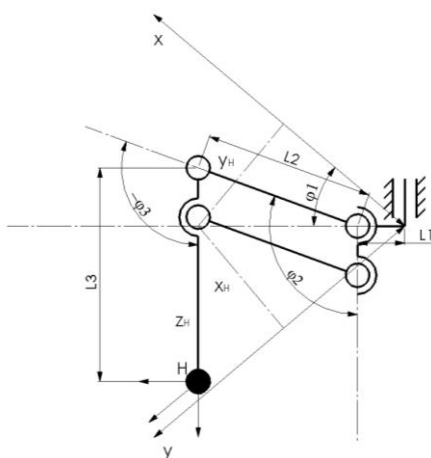
Както се вижда подреждането на избраните структури на база на съвкупността от всички избрани критерии е както следва:
 $C6 > C1 > C5 > C3 \approx C2 > C4$.

Съгласно анализът направен и по-горе – С6 и най-опростената С1 печелят с най-голям събран брой точки с малка разлика (0.006).

ГЛАВА 3. КИНЕМАТИЧЕН И КИНЕТОСТАТИЧЕН АНАЛИЗ

Решени са правата и обратна кинематична задача за избраните основни структури

3.1. Права и обратна кинематична задача



Фиг.3.1. Кинематична схема на регионални структури 6 и 7;

Решаването на правата задача за положението е свързана с определянето на координатите x_H , y_H , z_H на характеристичната точка H, която в текущият случай е края на звено подбедрица. При

три ротации (две активни и една зависима) и при определени дължини L_1 , L_2 и L_3 се приемат за обобщени координати ъглите φ_1, φ_2 и φ_3 , положението на характеристичната точка се определя от следните 3 уравнения[6]:

$$x_H = L_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + L_3 \cos \varphi_1 \cos(\varphi_2 + \varphi_3)$$

$$y_H = L_2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + L_3 \sin \varphi_1 \cos(\varphi_2 + \varphi_3)$$

$$z_H = L_1 + L_2 \sin \varphi_2 + L_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)$$

Ако се вземе в предвид че ъгли φ_2 и φ_3 ще имат винаги еднакви стойности поради зависимостта на движението при ротации 2 и 3 (**Фиг.2.27**), то уравненията по-горе ще добият вида:

$$x_H = L_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + L_3 \cos \varphi_1 \cos(0)$$

$$y_H = L_2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + L_3 \sin \varphi_1 \cos(0)$$

$$z_H = L_1 + L_2 \sin \varphi_2 + L_3 \sin(0)$$

Или:

$$x_H = L_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + L_3 \cos \varphi_1$$

$$y_H = L_2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + L_3 \sin \varphi_1$$

$$z_H = L_1 + L_2 \sin \varphi_2$$

Обратната кинематична задача има явно решение:

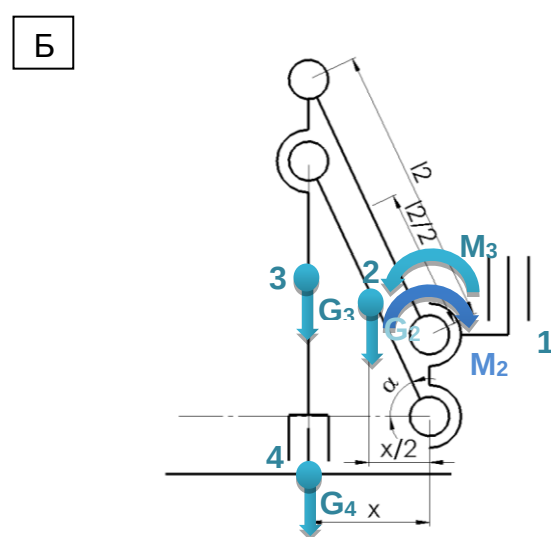
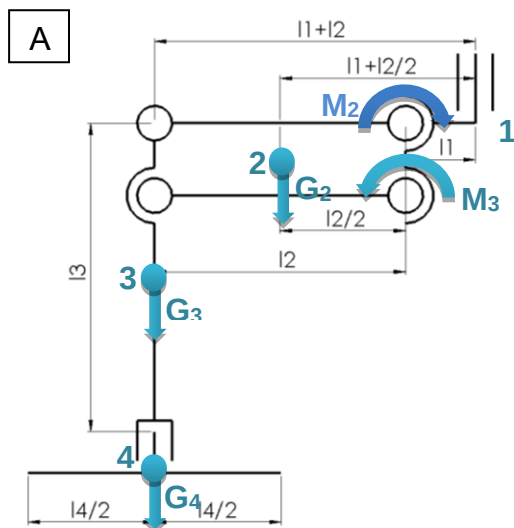
$$\varphi_1 = \arctan(y_H/x_H),$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{z_H + l_1}{(x_H^2 + y_H^2)^{\frac{1}{2}}} + \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 + x_H^2 + y_H^2 + (z_H - l_1)^2}{2l_2(x_H^2 + y_H^2 + (z_H + l_1)^2)^{\frac{1}{2}}},$$

$$\varphi_3 = \pm \left(\pi - \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 - x_H^2 - y_H^2 - (z_H - l_1)^2}{2l_2 l_3} \right),$$

3.2. Кинето-статични сили и моменти

Разгледани са силите и моментите в различните структури при съответно стъпил крак и при повдигане на крака за избраните финални структури (6 и 7). Определени са теоретично необходимите моменти в двигателите за повдигане на крака



Фиг.3.3. Кинематична схема на сили и моменти при Структура 7 при повдигане на крак. А). Първоначално повдигане; Б). Максимално повдигнат крак;

С представената по-горе фигура е разглеждано повдигането на кракът от земната повърхност. При това повдигане е приет идеализиран случай, в който звено „1“ е запънато, като част от скелета на робота, подготвил се да повдигне кракът и да го премести, и съответно не влияе със сили или моменти. Влияещите сили в показаната постановка са:

- G_2 – Сила на тежест породена от теглото на звено „2“
- G_3 – Сила на тежест породена от теглото на звено „3“
- G_4 – Сила на тежест породена от теглото на звено „3“
- M_2 – Момент породен от актуаторното звено – повдигащо крака.
- M_3 – Момент породен от сбора на силите на тежест на отделните звена.

Особен интерес тук представлява уравновесяването на системата, с оглед на това да се види какви трябва да са характеристиките на актуатора. За целта са изведени зависимостите между отделните сили и моменти:

При частният случай (Фиг.3.3.А) се наблюдава звено 2 в абсолютно хоризонтална позиция и следната зависимост:

$$M_3 = G_2 (l_2/2) + G_3 l_2 + G_4 l_2$$

Съответно за да може да се повдигне звеното и да се преодолее този момент с помощта на актуатора е необходимо моментът на актуаторът да е по-голям от резултантния M_3 :

$$M_2 > M_3$$

Тъй като масовите центрове менят своята позиция спрямо кинематичната двоица, където е разположен актуаторът, то разгледаният по-горе частен случай (Фиг.3.3.А) и изведеното уравнение са не винаги валидни. За да бъде по точно изразяването M_3 , трябва да бъде изведен като функция от разстоянието между образуващите го сили и точката на ротация. При прегледа на Фиг.3.3.Б., лесно може да се изведат зависимостите и да семодифицира изразът даващ момент M_3 , до:

$$M_3 = G_2 (x/2) + G_3 x + G_4 x$$

където:

$$x = l_2 \cos \alpha$$

замествайки се получава:

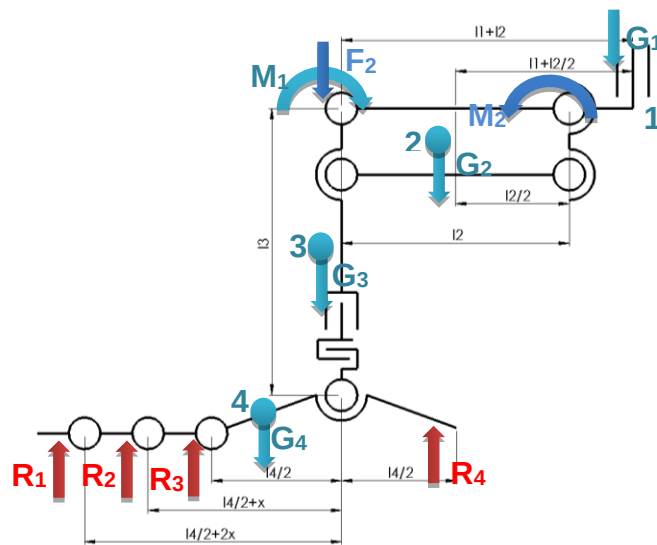
$$M_3 = G_2(l_2 \cos \alpha / 2) + G_3 l_2 \cos \alpha + G_4 l_2 \cos \alpha$$

$$M_3 = g(m_2(l_2 \cos \alpha / 2) + m_3 l_2 \cos \alpha + m_4 l_2 \cos \alpha)$$

От тук следва, че:

$$M_2 > g(m_2(l_2 \cos \alpha / 2) + m_3 l_2 \cos \alpha + m_4 l_2 \cos \alpha) \quad - (3.2)$$

Разгледани са същите зависимости и са изведени и за Структура 6

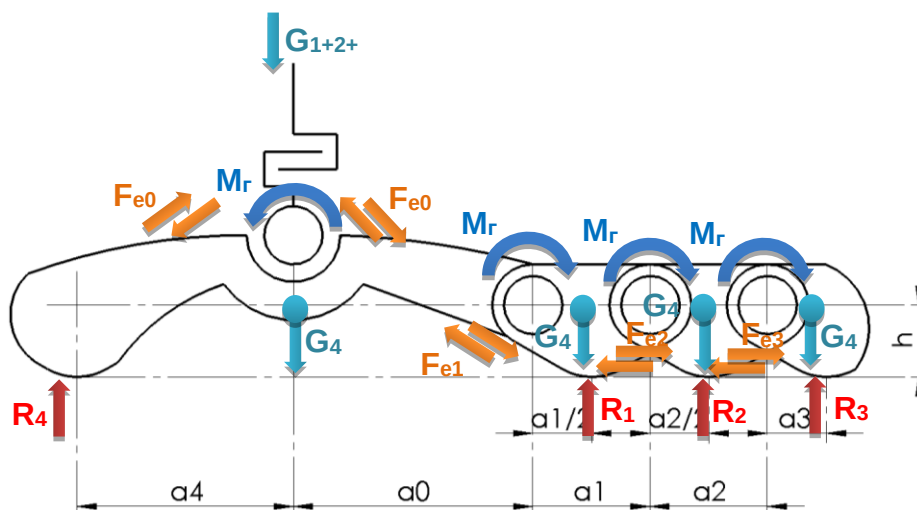


Фиг.3.5. Кинематична схема на сили и моменти при Структура 6 стъпил крак;

Разглеждайки фазата на вдигане на кракът от земната повърхност при структура 6, отново може да се заимства изчисленото вече при структура 7 (уравнение 3.2) и да се добавят теглата на новите компоненти част от стъпалото. Така формула 3.2 придобива следният вид що се отнася до изчисляването на структура 6, със следните условности (важи за структура с един пръст, само при вертикално изпънат напред пръст и ходило:

$$M_2 > g(m_2(l_2 \cos \alpha / 2) + m_3 l_2 \cos \alpha + m_{41} l_2 \cos \alpha + m_{42}(l_2 \cos \alpha + (a_0 + a_1 / 2)) + m_{43}(l_2 \cos \alpha + (a_0 + a_1 + a_2 / 2)) + m_{44}(l_2 \cos \alpha + (a_0 + a_1 + a_2 + a_3)))$$

Разгледани са и силите влияещи на стъпалото:



Фиг. 3.7. Конструктивна схема на стъпало във вертикална равнина минаваща през средния пръст.

Като са оценени и техните величини и съответно са изчислени какви трябва да бъдат силите в еластичните елементи:

$$F_{e3} \geq \frac{2(G_{44} a_3)}{h}$$

$$F_{e2} \geq \frac{2 \left[G_{44} a_3 + G_{43} \frac{a_2}{2} \right]}{h}$$

$$F_{e1} \geq \frac{2 \left[G_{44} a_3 + G_{43} \frac{a_2}{2} + G_{42} \frac{a_1}{2} \right]}{h}$$

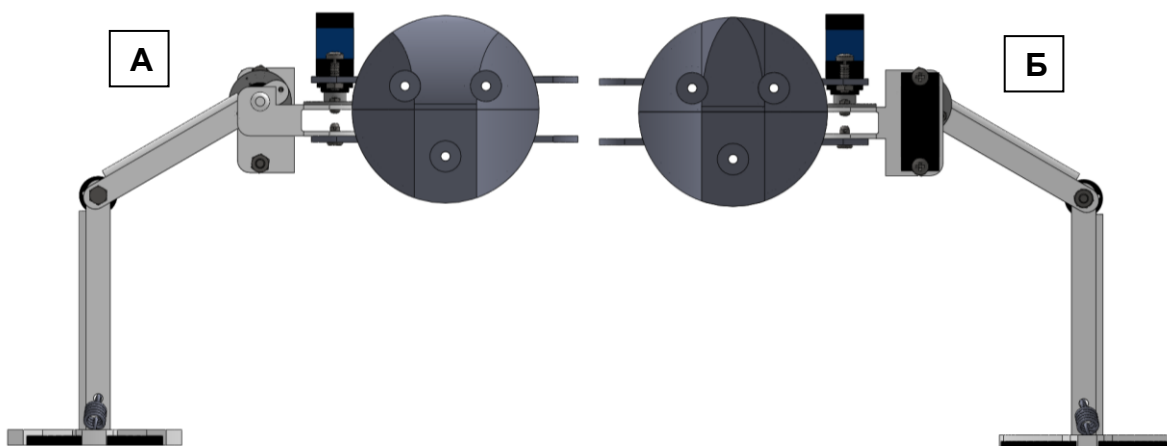
ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРАНЕ И РЕАЛИЗИРАНЕ НА КРАК И СТЬПАЛО

В настоящата глава са конструирани в триизмерен вариант избраните в Глава 2 структури 6 и 7, с помощта на специализиран софтуер. Анализирани са скорости, ускорения, сили и моменти, благодарение, на което са избрани и задвижващите модули. Структурите са реализирани последователно благодарение на технологията за триизмерно прототипиране и съответно изследвани в реални, освен във виртуални условия. Всички триизмерни модели, чертежи, изследвания, симулации, графики и данни са изведени с помощта на специализиран 3D CAD софтуер за проектиране на детайли и комбинирането им в по-сложни структури. SolidWorks 2013, дава възможност за по-добро развитие на крайния продукт, позволявайки бързо и лесно споделяне на файлове и съответно подобряване на екипната работа.

4.1. Структура 7

4.1.1. Триизмерно проектиране на звена и кинематични съединения

Структура 7 (която за краткост от тук нататък ще наричаме С7) представлява опростен аналог на Структура 6 (С6). Разликата между С6 и С7 от Глава 2 е единствено в стъпалото. С7 представя плоско стъпало, съставено от 2 твърди елемента, които не позволяват същите нива на адаптивност като С6, но представят значително по-контролируема и предсказуема система.



Фиг.4.2. Структура 7 – общ вид на преден десен крак. А. Изглед от пред; Б. Изглед от зад

Елементите изграждащи крака са четири основни: Рамо, Бедро, Подбедрица, Стъпало, два спомагателни: Макари, присъединителен баласт и два междинни: Раменен, и Тазов пояс, които са части от тялото на робота. На **Фиг. 4.2** е показан общия вид на С7, като за да се създаде цялостна представа за задвижването и свързването с тялото на робота е показан и раменния пояс. Кракът използва два дигитални електрически цифрови двигателя в рамото с перпендикулярни оси на задвижване и зависимо движение на подбедрицата. Зависимото движение в коляното се осъществява посредством предавка от две макари фиксирани неподвижно съответно за подбедрицата и бедрото свързани по между си с нишки с крайна дължина. Стъпалото е свързано към подбедрицата с щифтова връзка позволяваща ротация на 360° на двата компонента един спрямо друг. Ротацията е ограничена от инсталирани пружини, чиято цел е да връщат стъпалото в изходна позиция при повдигането на крака във въздуха.

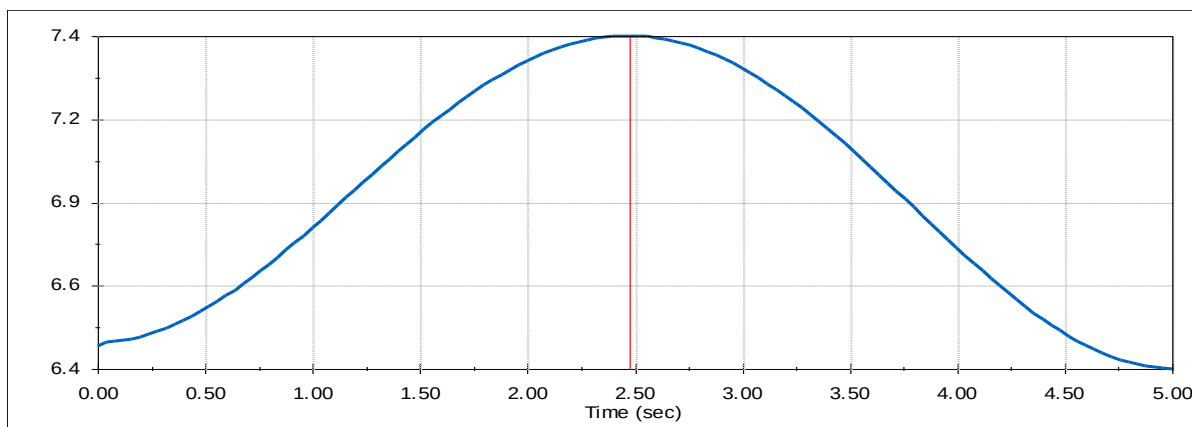
4.1.2. Избор на тип задвижване и задвижващ елемент. Схеми на задвижване

От вече изведените зависимости в **Глава 3** и на база на това, че вече има параметрите (маса и размери) на отделните елементи изграждащи С7, замествайки в отделните уравнения с естига до следните числени резултати, при следните условия ъгъл алфа да бъде винаги 0° , с оглед да намерим максималният момент:

$$M_2 > 9.8 (0.00285 * 0.075) + 0.00359 * 0.075 + 0.00714 * 0.075)$$

$$M_2 > 0.0099 \text{ [N.m]}$$

Благодарение на опростените и олекотени части, необходимия момент за повдигане на бедрото и подбедрицата е 7 N.mm, което е 0,0074 N.m. Тази стойност е определена на база симулация при повдигането на крака на 60° за 5 секунди. (виж **Графика 4.1.**). Като пикът на момента е при хоризонтално положение на бедрото и се наблюдава при 2.5 секунда от експеримента.



Графика 4.1. Момент в [N.m] при повдигане на рамото и подбедрицата при определяне на работната зона на крака.

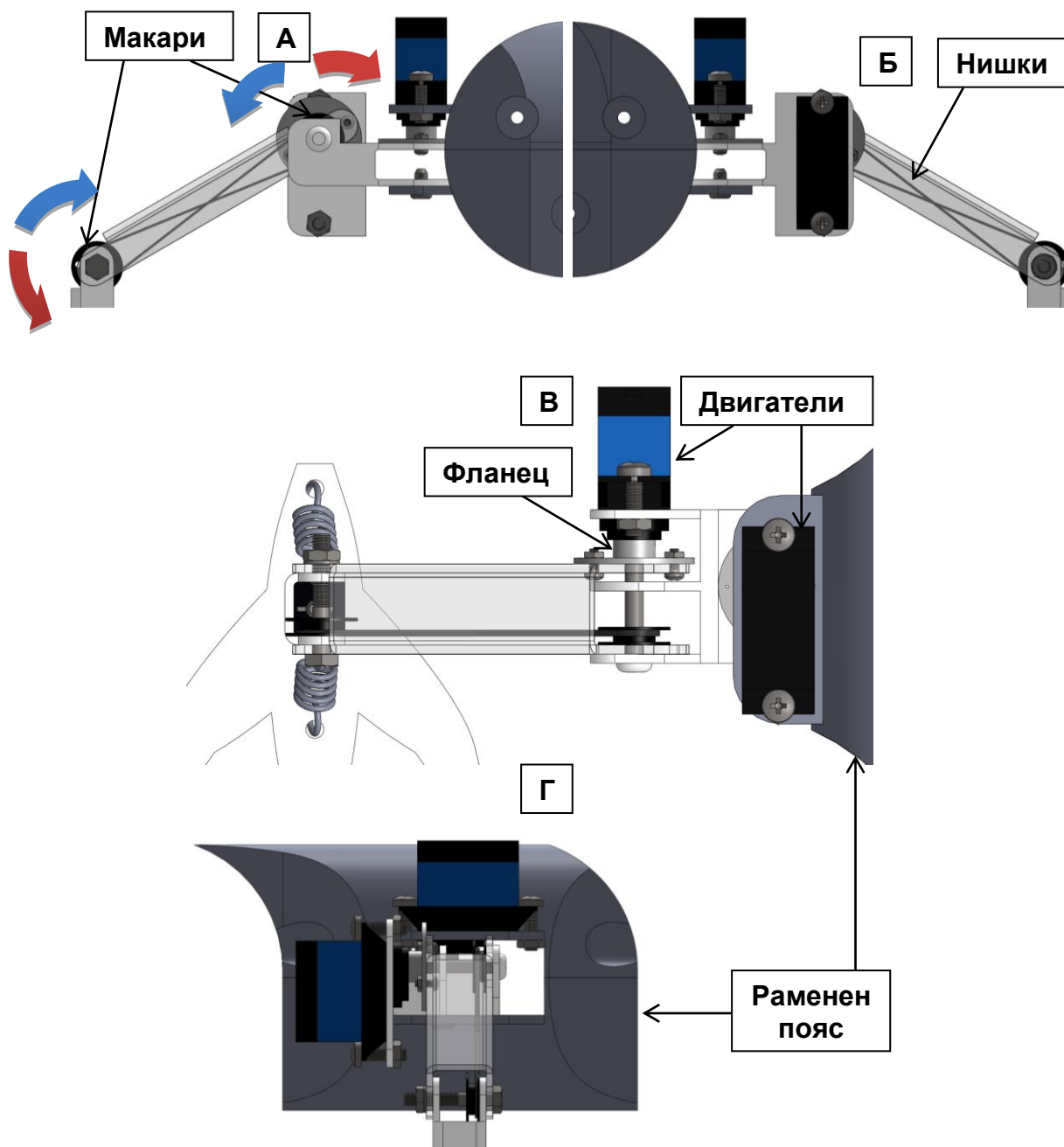


Фиг.4.6.Двигател Mirco Servo HD-1581HB на компанията Power HD.[32]

Тип на мотора:	Дигитален с цифрово управление
Тип лагериране:	Тор търкалящи лагери
Скорост (6,0V)	0.16 sec/60°
Ускорение/втръщ момент N.m/ (6,0V)	0,255
Размер в милиметри:	31.2 x 12 x 29.7
Тегло в грамове:	12,3

Този двигател е избран поради няколко причини:

- Малки размери и тегло (позволява монтаж директно в ставата).
- Въртящ момент удовлетворяващ изискванията на структурата (0,255N.m в сравнение с необходимите изчислени 0,0099 N.m и имащ запас да поеме непредвидени на този етап тежести в крака (скрепителни елементи, нишки)
- Финансови параметри – Цена:17 USD

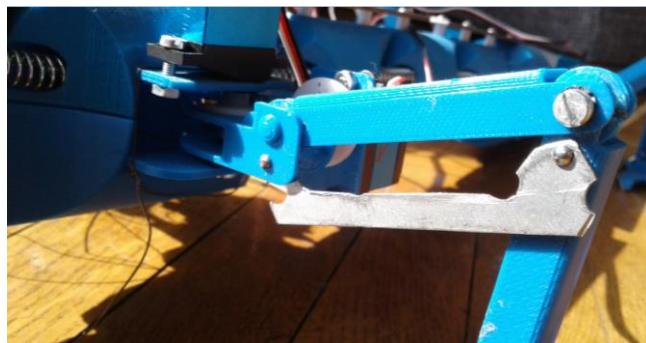


Фиг.4.7.Разположение на задвижващите елементи А.Изглед отпред; Б.Изглед отзад; В. Изглед от горе. Г Изглед от страни.

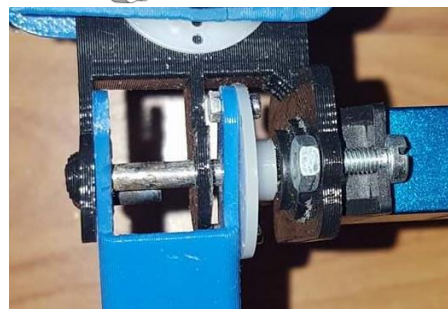
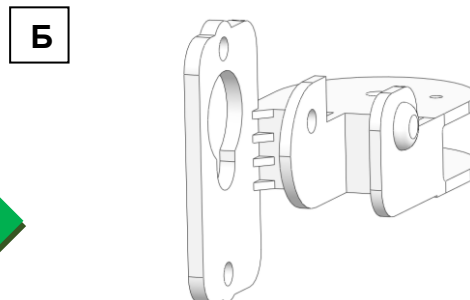
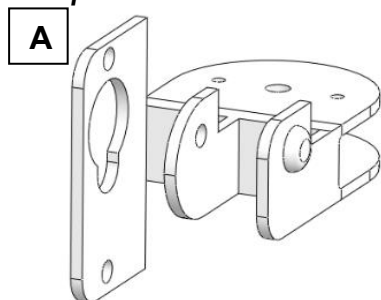
Направен е статичен силов анализ на структура посредством продуктите за симулация в SolidWorks – Simulation.

4.1.3. Реализиране на избраните структури, чрез технологията за триизмерно прототипиране

Структурите са реализирани благодарение на технологията за триизмерно прототипиране FMD. На база на тестове в реално време са установени слабости в конструкцията, които са оптимизирани, чрез добавяне на материал и спомагателни елементи:



Фиг. 4.18. Изменение на конструкцията с цел оптимизиране точността на зависимото движение на подбедрицата – добавяне на метална пластина вместо система с нишки и макари.

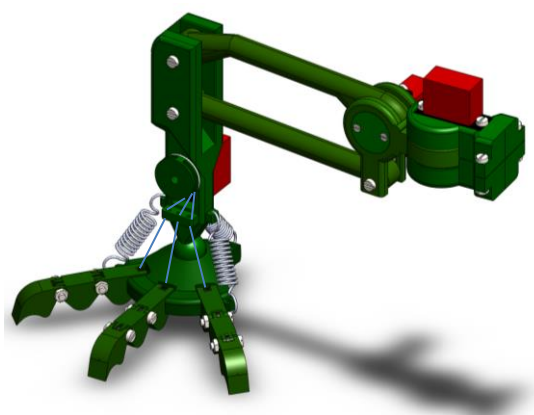


Фиг. 4.20. Оптимизации в елемент рамо. А). Първоначален дизайн; подобренията

Б). Дизайн след

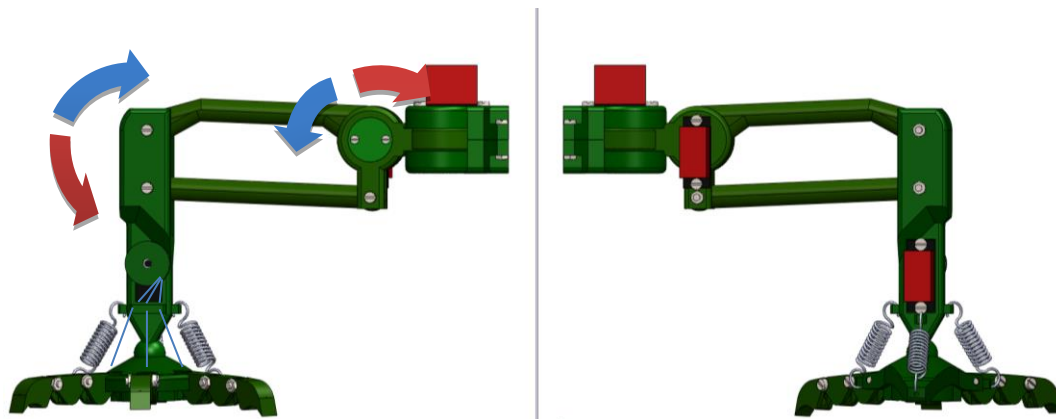
4.2. Структура 6

4.2.1. Триизмерно проектиране на звена и кинематични съединения

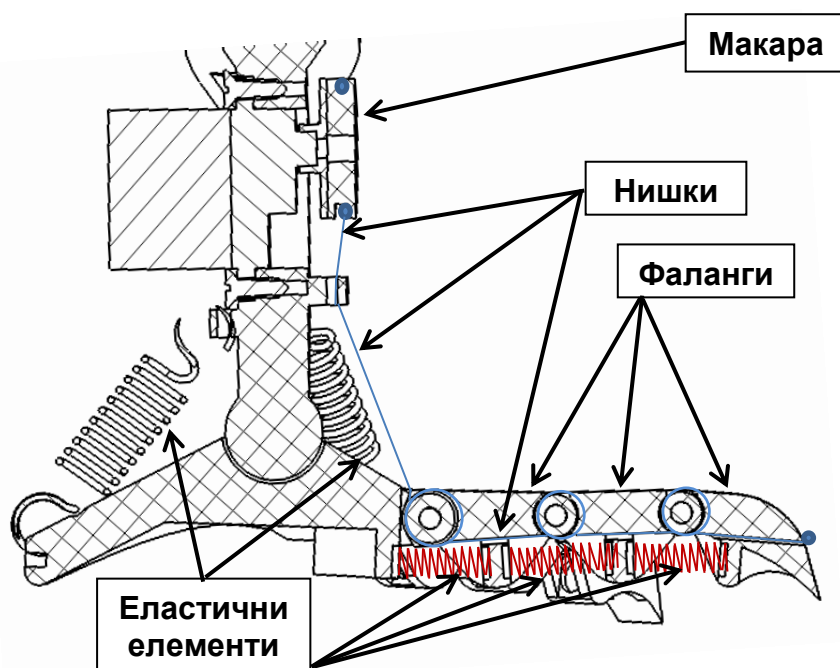


Фиг. 4.21. Триизмерен вариант на Структура 6.

С6 запазва кинематичната схема на показани съответно в Глава 2 и 3, както и вида на кинематичните двоици. Елементите изграждащи крака се запазват Рамо (основа), Рамо, Бедро, Подбедрица и Стъпало, но при проектирането им са взети под внимание натрупаният опит и резултати от тестовите на С7. В паралел се отчитат и развиването на значително усложнена структура на стъпало, с разширени адаптивни способности.



Фиг.4.22. Общ изглед на Структура 2 – посоки на пасивното задвижване.



Фиг.4.27. Елементи изграждащи стъпалото – Разрез на пръст и връзка с подбедрицата

ГЛАВА 5. ФУНКЦИОНАЛНИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

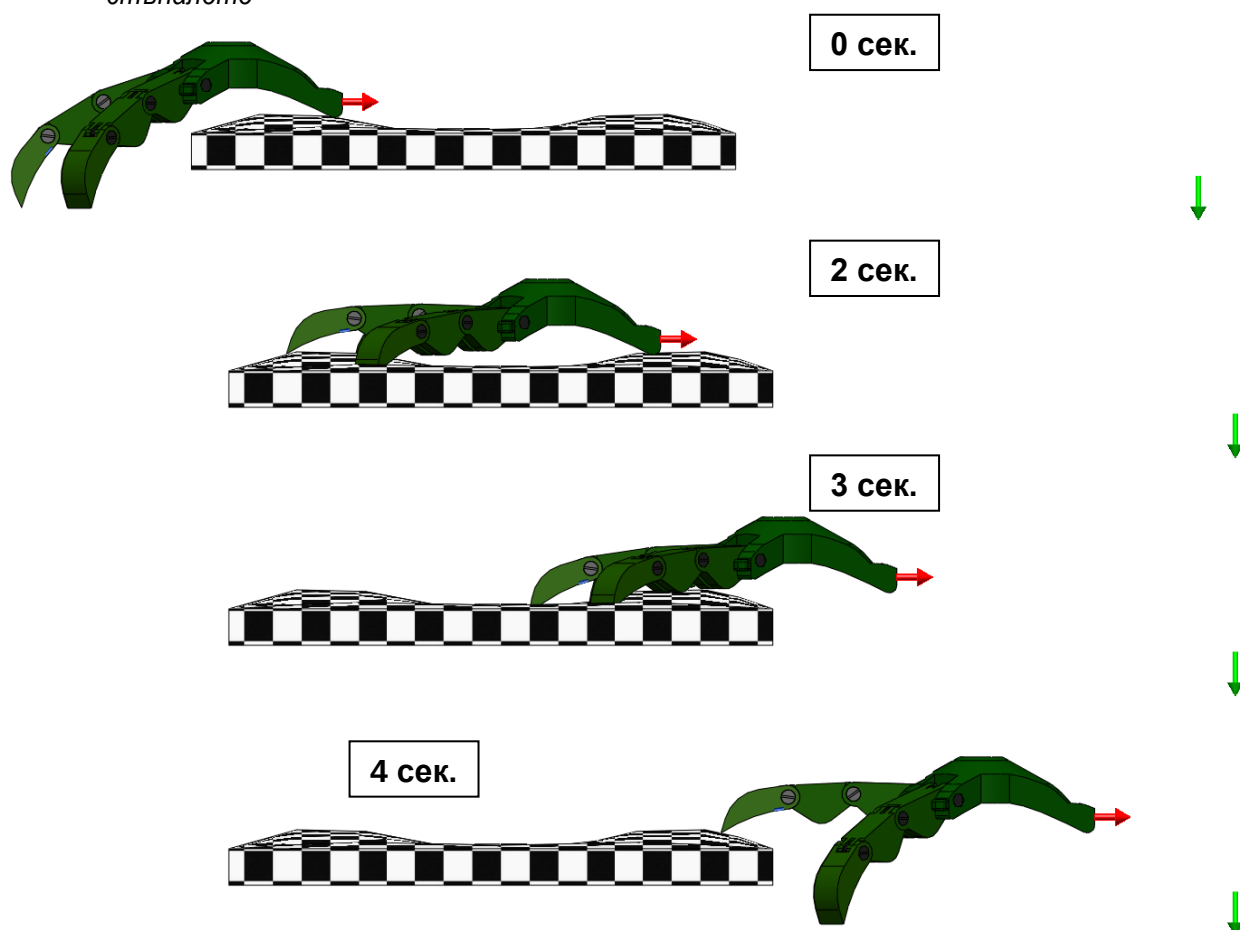
Всички експерименти и изследвания, описани в тестове в настоящата глава, независимо дали са направени с помощта на специализираният софтуер (Solid Works Simulation) или върху реалният модел на С7, спомагат и са причина за описаните в Раздел 4.1.5 подобрения и модификации. Най-условно експериментите са разделени на два вида: Софтуерни симулации и Прототипни симулации.

5.1.1.1. Симулация 1

Първата симулация засяга само стъпалото и движението на пръстите върху неравна повърхност при плъзгане на цялата конструкция. В конкретната симулация основата не влиза в контакт с повърхността а се запазва успоредна по време на цялото движение. В пръстите и макарите не са приложени каквито и да е външни моменти или сили, освен гравитационна. Идеята на симулацията е да покаже възможностите на пръстите да се адаптират към неравен терен.

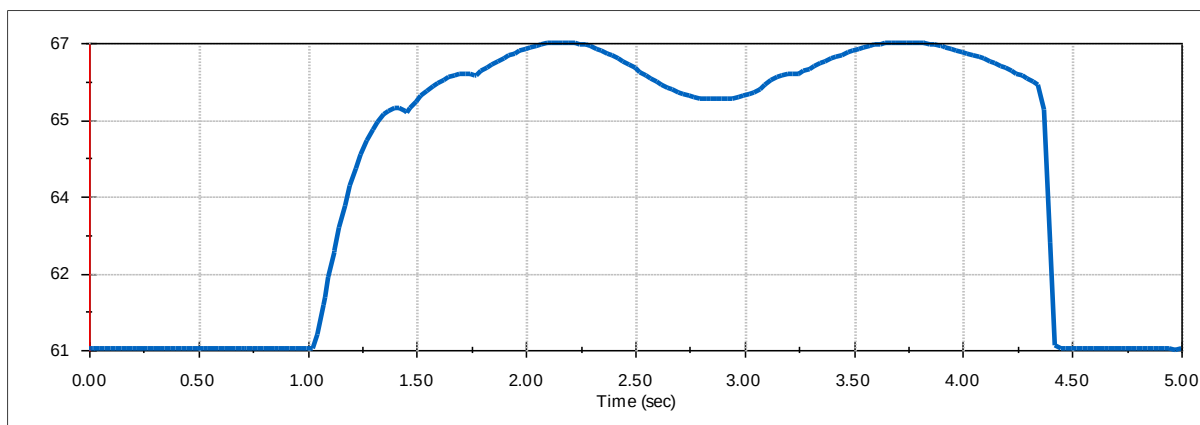
Приложените сили и зависимости са:

- Гравитационна сила (Зелената стрелка - **Фиг.5.5**)
- Линейна сила (червената стрелка – **Фиг.5.5.**)
- Зависимост и контактни сили в ставите
- Успоредност спрямо и отстояние на 15мм. от повърхността на терена, на основата на стъпалото



Фиг.5.5. Преместване на стъпалото при плъзгане върху неравна повърхност

Най-ясно може да бъде онагледен контактът на пръстите и терена, както и формата на терена на **Фиг.5.6**. Графиката представлява преместване по Y, където Y е ординатата на равнината в която стъпалото се премества от ляво на дясно. (**Фиг.5.5.**) За точка, преместваща се по Y е взета точката върха на „нокътя“ на средния пръст на стъпалото. От графиката ясно се вижда, че до 1-ва секунда преместване няма, след което се наблюдава плавен скок, съответстващ на контакта между пръста и ръба на терена. Леките смущения при 1.4 сек и 1.6. се дължат на зададените зависимости във ставите.



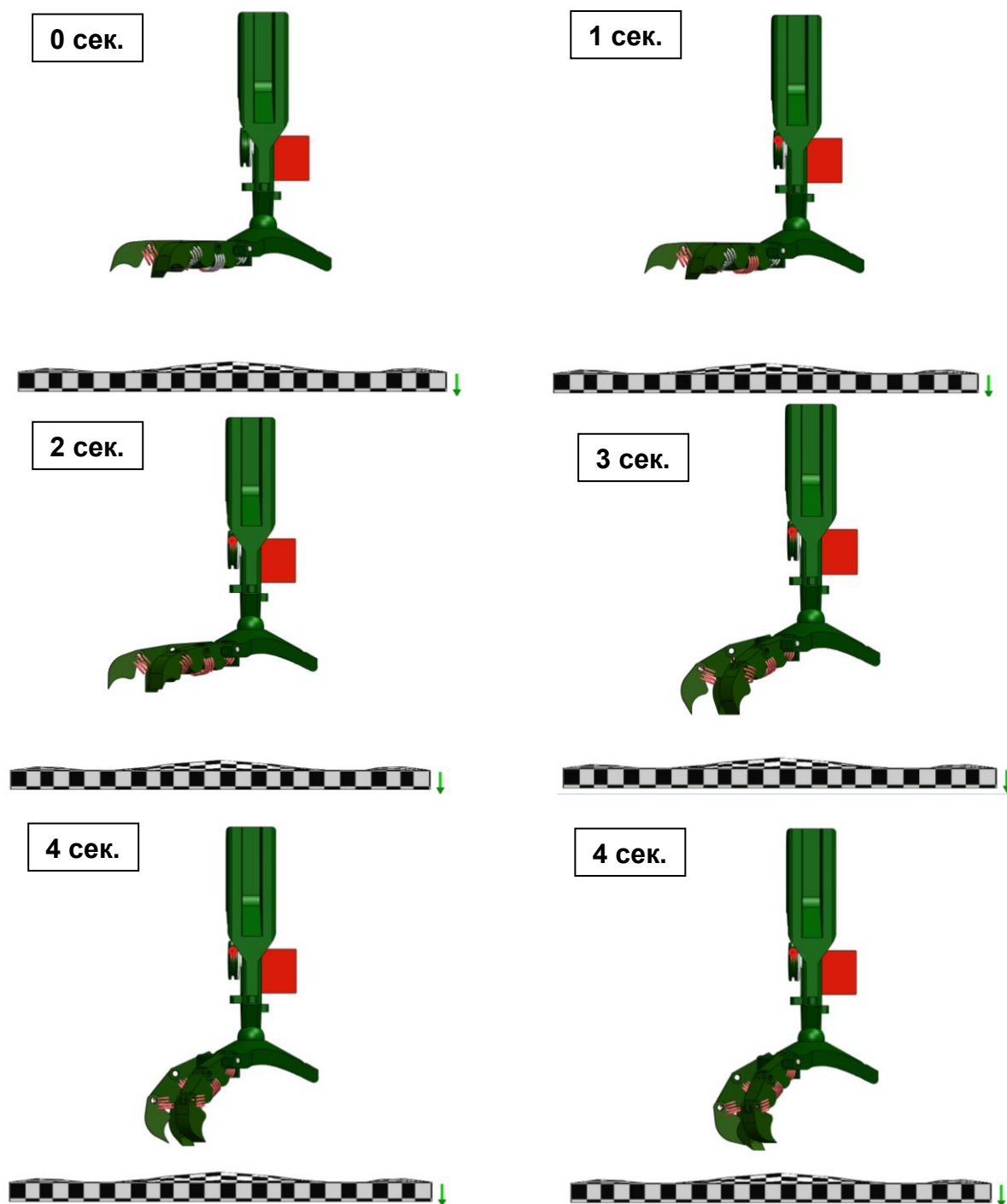
Фиг.5.6. Преместване по Y на точка на върха на „нокътя“ на средният пръст на Структура 2.

5.1.1.2. Симулация 2

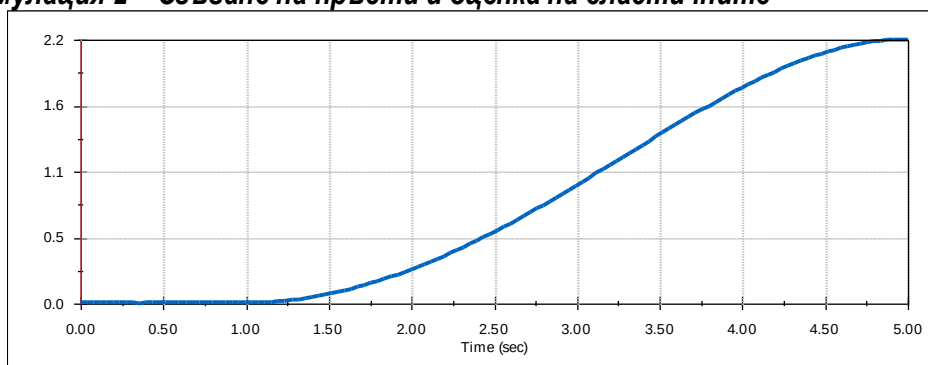
Симулация 2 представлява тест за свиването на пръстите посредством нишков механизъм. При теста ще могат да бъдат оценени силите в еластичните елементи (пружините), както и да се види дали пружините поставени в пръстите с техните характеристики удовлетворяват изискването да държат фалангите „стандартно“ разпънати, при наличие на гравитационна сила. Тъй като при свободна основа на стъпалото и свободни фаланги, свързани посредством еластични елементи, Софтуерът среща затруднения и калкулациите на микродвиженията породени от еластичните сили, отнемат часове. За да се спести време оценката на връзката бедро – стъпало и връзките фаланги стъпало, са разделени. В настоящата симулация ще разгледаме поведението на пръстите при изкуствено фиксирана основа на стъпалото.

Постановка на симулацията:

- Гравитационна сила;
- Фиксирана подбедрица;
- Фиксирана основа на стъпалото;
- Еластични елементи между фалангите и между последната фаланга и основата на стъпалото със следните характеристики:
 - Размер на тела: 1mm
 - Външен диаметър на пружината: 5 mm.
 - $K=1N/mm$
 - Дължина на пружината (в зависимост от разстоянието в свободно състояние, изпънато състояние между фалангите).
- Зависимо движение – Макара на ротационен двигател в рамото и фалангите както следва:
 - Завъртане на двигател от секунда 1 до секунда 4 на 30°



Фиг 5.6. Симулация 2 – Сгъване на пръсти и оценка на еластичните



Фиг.5.8. Графика изобразяваща реакцията в [N] при Пружина 1 (свързваща основата на стъпалото и първата фаланга).

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни:

1. Направен е структурен синтез на множество от възможни решения на крак с три управляеми степени на свобода, от които мотивирано са избрани два варианта за проектиране, като към края на последното звено е поставена сферична става за връзка с пета и три пръсто адаптивно стъпало, всеки пръст на което има три пасивни степени на свобода, които едновременно се активират от управляемо движение с двигател разположен в подбедрицата.
2. Извършен е кинематичен и кинетостатичен анализ, чрез решаване на правата и обратна задачи, като са изведени зависимости за определяне на работно пространство при повдигнат и опорен крак, както и за определяне на силите и моменти в ставите.
3. Проектирани са двете избрани структури на крак и стъпало с помощта на 3D програмни продукти с варианти на идейните решения по отношение на задвижването с нишки и паралелограмен механизъм, както и на стъпалото като кръгло, три пръста без подвижности и с три пасивни степени на всеки пръст.
4. Изработени са, чрез технология за 3D принтиране, четири крака за модел на гущер и е направен монтаж върху експерименталния модел, чрез който са проведени функционални експерименти и изследвания, включващи симулация и заснети функционални движения.

Приложни:

1. Направен е и систематизиран обзоре анализ на биологични скелетни и мускулни системи на крака и стъпала на гущери, както и на съвременни инженерни решения в областта.
2. С помощта на специализиран софтуер за управление и в съавторство с докторантът маг. инж. Н. Димитров, са разработени компютърни алгоритми, с чиято помощ прототипът на робота гущер може да се движи и да се провеждат експериментални изследвания.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- Петров Б., Павлов В., „Синтез на крака с три активни и три пасивни степени на свобода за мобилен робот аналог на гущер“ „Механика на машините“ 2010 г., XVIII, книга 7, стр. 18-23, ISSN 0861-9727
- Павлов В., Петров Б., Ханджиев, Й., Димитров Н., „3D структура на мобилен робот изградена върху биомеханична аналогия със скелетна система на гущер“, „Сборник доклади от XX Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2011“, Созопол - юни 2011
- Павлов В., Петров Б., Димитров Н., „Моделиране на контактно взаимодействие между опорната равнина и стъпалото на крачещ робот, съдържащо пасивни степени на свобода“, „Механика на машините“ 2012 г., година XX, книга 3, стр. 37-43, ISSN 0861-9727
- Петров Б., Павлов В., „Обзор и анализ на инженерни решения на крака на роботи аналози на живи организми“, „Сборник доклади от XXII Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2013“, Созопол - юни 2013
- Павлов В., Димитров Н., Петров Б., „Равнинни модели за движение на робот с четири крака, съдържащ гръбначен стълб с еластични шарнири“, „Сборник доклади от XXIV МНТК-АДП 2015, Созопол, 2015
- Петров Б., „Инженерни решения на стъпала при мобилни роботи аналози на гущери. Моделиране на Активно-пасивно задвижвано стъпало, част от робот аналог на гущер,“ ; „Българско списание за инженерно проектиране“ ISSN 1313-7530, брой 33, 2017

ADAPTIVE FOOT LEG FOR LIZARD ANALOGUE ROBOT

Abstract

The PhD thesis object of current resume is combining detailed biological and technical overview of examination of biological lizards and lizard-like species and know robots analogues of animals.

First chapter is giving detailed overview of biological specimens, starting from skeletal and joint structure of several Komodo dragons, going through muscular activities during walking, and grasping of more than 5 different lizards, ending with muscular activities during running of lizard Sceloporus clarcki. It is presenting also detailed overview of limb and foot positions, grasping force and joint activities. Technical overview is another part of the research first chapter. Five structures of Legs, used in animal like robots are analyzed summarizing solved and unsolved problematics

The foundation of the research gives the opportunity for Chapter 2 to introduce variety of ideas for development of leg structures. All proposals are evaluated during the creation process via sanity checks and cross references to the formulated goal and requirements of the thesis. In the end - six structures are examined based on binary evaluation method and two are selected with the highest scores to be developed into 3D models and further tested.

Chapter 3 concerns making a kinematic and kineto-static analysis of the shortlisted configurations. Moments, Reaction Forces and Inertial moment's dependencies are calculated and presented.

Chapter 4 reviews the 3D modeling of the highest scorers. Standard and Non-standard components are introduced, evaluated and assembled in a single structure. Based on analytic (chapter 3 dependencies) and also via Simulation software (Solid Works) - needed moments in the joints for the units movement are defined. Given the results from the simulations, actuator characteristics are defined. Motors is chosen and purchased in order to be integrated in the structure.

Chapter 5 is describing the various test which are done on the examined legs. Test are both in software environment, and also in real conditions. Both structures are porotype via 3D printing technology. One of them is integrated in lizard like mobile robot – “L2” (part of Nikolay Dimitrov PhD thesis).