



Стратегическое  
общественное  
движение

[www.2045.ru](http://www.2045.ru)

ОБЗОР

«ТРИЗ – АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ИСКУССТВЕННЫХ МУСКУЛОВ»

Авторы: Беляев А.Ю.

Щукин Т.Н.

г. Москва

2012 год

**Цель работы:** описать несколько новых принципиальных решений в создании «искусственных мышц», обосновать перспективность предложенных решений при помощи ТРИЗ.

**Задачи работы:** обобщить траектории развития идей о строении искусственных мускулов, вывести закономерности, описать ранее не реализованные принципы создания новых типов искусственных мускулов, выполняющих ту же функцию.

*\* Первоначальная формулировка задания предполагала провести анализ в области разработки искусственных мускулов на основе электроактивных полимеров, но в связи с тем, что принципиальных моделей здесь всего две (ионная и диэлектрические эластомеры), было решено подойти к вопросу масштабнее, с рассмотрением родственных направлений, основанных на других технических решениях, и с обобщением основных линий развития технических систем по классу «искусственные мускулы».*

#### Описание проблемного поля

##### Актюаторы как аналоги мускулов

##### Электромеханические «мускулы»

##### Пневмомускулы

##### Полимерные мускулы

##### Уровни постановки задач

##### Уровень мускула – «притягиватель»

##### Уровень морфологического органа – двигательная единица: рычаги – сочленения – мышца

##### Уровень организма – опорно-двигательный аппарат

##### Противоречия в существующих образцах искусственных мышц

#### Определение перспективных направлений разработок

##### Анализ функционального состава актюаторов

##### Морфологический анализ актюаторов

##### Модификация существующих решений

#### Приоритетное направление исследований

##### Описание задачи

#### Выводы

##### Приложение. Линии развития ТС «Искусственный мускул»

## Описание проблемного поля

### О подходах к разработкам

Словосочетание «искусственные мускулы» само по себе апеллирует к аналогиям с живой мышечной тканью. Строение и принципы работы мышц изучены достаточно глубоко, однако воспроизвести их инженерными средствами на современном уровне развития науки и технологий не представляется возможным. Следовательно, **бионический** подход в данном случае лишь порождает психологическую инерцию, ограничивая возможности исследователей.

Другой подход – **функциональный**, выросший из практики протезирования и роботостроения, – позволяет более широко подходить к моделированию искусственных мускулов, так как указывает на необходимость воспроизведения функции мышцы на микро- и/или макроуровнях, не внося дополнительных ограничений в средства и материалы реализации функции, реализуя, таким образом, принцип изофункционализма.

В случае функционального подхода за основу берется главная функция мышц, которую они выполняют в организме. Очевидно, что эта функция – моторная, которую можно определить как *перемещение в пространстве и относительно друг друга элементов кинематической цепи организма*<sup>1</sup>.

### Требования к моделям

Нужно иметь в виду, что мышцы в составе опорно-двигательного аппарата участвуют в пространственных перемещениях организма (локомоциях) и манипуляциях с пространственными объектами – т.е. в предметной деятельности. Это обстоятельство предъявляет дополнительные требования к искусственным мышцам – по параметрам усилия, размеров, массы, точности, управляемости.

Таким образом, исследователь в процессе моделирования искусственной мышцы вынужден держать прицел на сферу применения – в составе человекоподобного устройства и в условиях, приближенных к стандартной жизнедеятельности человека, так как именно эта сфера применения и задает ограничения на возможные реализации системы.

Стремление к точному копированию живых мускулов, с одной стороны, и полное абстрагирование от условий реального применения искусственных мускулов, с другой, – две крайних степени использования принципа антропоморфизма в исследовательской работе.

Для правильной постановки задач мы должны опираться на этот принцип, используя его в качестве методологического «зума», тем самым по мере необходимости управляя масштабом научного запроса.

---

<sup>1</sup> В качестве объекта моделирования мы рассматриваем в первую очередь скелетные мышцы, а не гладкую мускулатуру.

С чем связана такая необходимость?

Предварительное знакомство с проблематикой показало, что даже передовые исследовательские центры, которые занимаются искусственными мышцами, на самом деле ограничивают себя достаточно узкой областью – как правило, углубленным изучением свойств отдельно взятых полимеров или их комбинаций.

Как объясняет М. Яблоков (см. [реферат](#)), это отчасти связано с поражением в 2005 году на соревнованиях по армрестлингу, где против человека были выставлены три образца – имитации человеческой руки с искусственными полимерными мускулами от ведущих команд разработчиков. После того как 17-летняя девушка победила три подряд искусственные руки, у выставивших их разработчиков пропало ощущение эйфории от достигнутых результатов и ожидаемых перспектив.

Они столкнулись с противоречием, которое не могли преодолеть, и фактически отложили в долгий ящик первоначальную задачу, поставленную доктором Йозефом Бар-Козном (Yoseph Bar-Cohen) из Лаборатории реактивного движения НАСА, – **создание полноценных силовых искусственных мускулов**. Возможно, ограничивающим фактором стали требования, сформулированные самим же Бар-Козном, – о том, что решение должно содержаться в особенностях самих полимеров, без участия других веществ и приспособлений.

Таким образом, в настоящее время разработчики полимерных мышц удовлетворяются силовыми микроэффектами, которые дают полимеры. Прорывных решений в этой области пока не было, хотя, и это следует из бесед М.Ю. Яблокова с руководителем ассоциации по искусственным мышцам, именно новые, прорывные решения – это все, на что сегодня надеются разработчики. В традиционном проблемном поле не содержится никаких перспективных теорий, гипотез или предложений в области создания искусственных мышц, способных удовлетворить требованиям, сформулированным Йозефом Бар-Козном.

Исходя из сложившейся ситуации наилучшей тактикой была принята параллельная работа по двум направлениям:

- 1 Анализ наиболее перспективных из имеющихся образцов силовых аналогов мышц, включая электромеханические сервоприводы, пневмомускулы и ЭАП. Цель анализа – вытянуть максимальную эффективность из их конструкции и состава при помощи применения аппарата ТРИЗ для анализа их недостатков и незадействованных ресурсов. При этом было принято решение отказаться от искусственных ограничений, содержащихся, помимо прочего, в постановке задачи Йозефом Бар-Козном (запрета на использование других материалов, кроме ЭАП), и руководствоваться идеальным конечным результатом.
- 2 Целенаправленный поиск новых идей. Перечень существующих вариантов выполнения функции «искусственных мышц» довольно короток. При этом очевидно, что главная функция искусственных мышц может быть реализована в намного большем многообразии вариантов. Для генерации новых идей был проведен ряд сессий с использованием методов увеличения вариантов идей (от мозгового штурма до синектики и аналогий). Наиболее перспективные идеи были подвергнуты более глубокой проработке. По наиболее перспективным идеям

требуется провести серьезное исследование, включающее в себя работу с группой привлеченных экспертов по разработанному регламенту, с последующим проведением НИР и НИОКР по наиболее перспективным направлениям.

Ниже находится результат работы по этим направлениям, анализ существующих актюаторов (искусственных мышц), анализ принципов их работы, обобщенное описание этих принципов, формирование дерева решений, а также описание некоторых процедур генерации новых идей.

## **Актюаторы как аналоги мускулов**

Функционально к искусственным аналогам мускулов можно отнести целый класс устройств, называемых актюаторами, или [исполнительными устройствами](#).

Под исполнительным устройством (также **актуа́тор**, **актюатор**) в теории автоматического управления понимают устройство, передающее воздействие с управляющего устройства на объект управления. Иногда рассматривается в качестве составной части объекта управления. Управляющим устройством может быть любая динамическая система. Входные и выходные сигналы исполнительных устройств, а также их методы воздействия на объект управления могут иметь различную природу.

В технике исполнительные устройства представляют собой преобразователи, превращающие входной сигнал (электрический, оптический, механический, пневматический и др.) в выходной сигнал (обычно в движение), воздействующий на объект управления.

Устройства такого типа включают: электрические двигатели, электрические, пневматические или гидравлические приводы, релейные устройства, электростатические двигатели (англ. *Comb drive*), DMD-зеркала и электроактивные полимеры, хватающие механизмы роботов, приводы их движущихся частей, включая соленоидные приводы и приводы типа «звуковая катушка» (англ. *Voice coil*), а также многие другие.

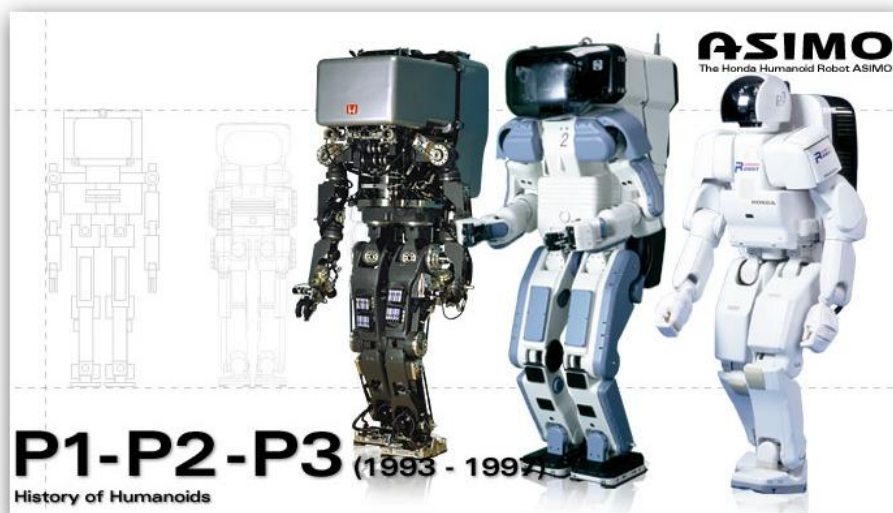
Остановимся на нескольких вариантах, на основе которых уже реализованы устройства, выполняющие моторную функцию, сходную с аналогичной в живом теле.

### **Электромеханические «мускулы»**

Рассмотрим, за счет чего передвигается самый популярный робот – ASIMO от Honda.

Конструкторы подошли к проблеме комплексно – они изначально поставили задачу скопировать человека целиком, как движущуюся систему. «Человекоподобие» в данном случае сводилось к повторению габаритных характеристик человека – размеров и пропорций. Поэтому образцом для «опорно-двигательного аппарата» ASIMO стал человеческий скелет в приближенных к реальным размерам.

На этом копирование анатомии закончилось. Чтобы заставить скелет робота двигаться, инженеры использовали то, что им было хорошо знакомо, – электрические моторы, причем вмонтировали их прямо в суставы робота. Получился самодвижущийся скелет.



Если проследить эволюцию ASIMO, то четко видны направления его развития: уменьшение габаритов и веса, повышение динамических характеристик.

Первый робот, Honda P1, был размером с рослого мужчину, но весил более 200 кг, довольно громоздкий и неуклюжий, так что представлял опасность для находящихся поблизости людей. Современный ASIMO имеет рост 130 см и вес 54 кг. Как утверждают представители Honda, эти параметры выбраны специально – чтобы робот выглядел дружелюбнее, однако, скорее всего, это компромисс, обусловленный весом сервомоторов и обслуживающих их систем (внутри «туловища» – аккумулятор, он же центр тяжести, под кожухами – системы охлаждения двигателей, редукторы и приводы, в ранце на спине – управляющий компьютер).

Инженеры уже столкнулись с противоречием – необходимостью, с одной стороны, увеличения количества сочленений и сервоприводов для лучшей координации движений в различных условиях, а с другой – невозможностью этого, так как дополнительные моторы недопустимо увеличивают вес робота.

Недостатки выбранного компромиссного решения видны уже сейчас: последняя модель ASIMO, несмотря на ловкость перемещений, не отличается силой.

Можно предположить, что в недалекой перспективе роботам этого типа даст небольшую фору увеличивающаяся согласно закону Мура мощность процессоров, что позволит уменьшить размеры «ранца». Может быть, будут достигнуты успехи в области аккумуляторов – уменьшится их вес и увеличится емкость. Для изготовления самого «скелета» уже используются самые легкие и прочные сплавы. Однако уже становится ясно, что противоречие упирается в свойства материалов, из которых изготовлены моторы.

Чтобы развивать ASIMO дальше, потребуются принципиально новые «мышцы».

Возможно, это будут полимеры, но совсем не обязательно «мышцеподобные», т.е. которые крепятся на скелет снаружи. Не исключено, что развитие будет продолжаться в направлении модификации системы «самодвижущийся скелет».

**Резюме:** недостатки актюаторов роботов состоят в том, что они тяжелые, твердые, слабые. Преимущество с точки зрения разработки – принцип «человекоподобия» – не

позволяет упускать из виду главную функцию проектируемых систем, т.е. не происходит размывания задач. Ценная идея для проектирования искусственных мускулов в том, что реально используемая двигательная единица включает как движитель, так и элементы скелета, которые он движет. Это соответствует [закону полноты частей системы из ТРИЗ](#).

#### **Закон полноты частей системы**

Любая техническая система, самостоятельно выполняющая какую-либо функцию, имеет *четыре основные части*: двигатель, трансмиссию, рабочий орган и средство управления. Если в системе отсутствует какая-либо из этих частей, то ее функцию выполняет человек или окружающая среда.

**Двигатель** – элемент технической системы, являющийся преобразователем энергии, необходимой для выполнения требуемой функции. Источник энергии может находиться либо в системе (например, бензин в баке для двигателя внутреннего сгорания автомобиля), либо в надсистеме (электроэнергия из внешней сети для электродвигателя станка).

**Трансмиссия** – элемент, передающий энергию от двигателя к рабочему органу с преобразованием ее качественных характеристик (параметров).

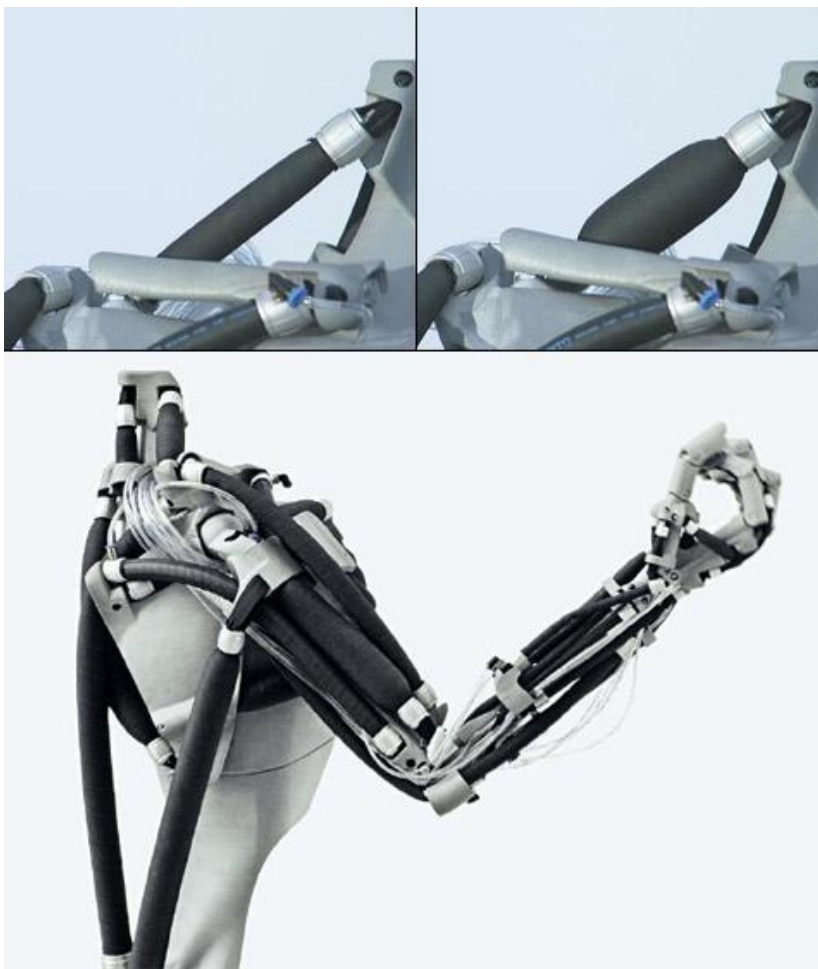
**Рабочий орган** – элемент, передающий энергию на обрабатываемый объект и завершающий выполнение требуемой функции.

**Средство управления** – элемент, регулирующий поток энергии к частям технической системы и согласующий их работу во времени и пространстве.

### **Пневмомускулы**

Встречаются устройства, которые хотя и называются «искусственными мышцами», но функционально больше претендуют на роль «трансмиссии» в этой технической системе. К ним можно отнести различного рода гидравлические и пневматические приводы, в которых энергию для совершения движений передают соответственно жидкость или газ. В любом случае для функционирования такой «мышцы» требуется двигатель. Часто это внешний компрессор. Рассмотрим один из таких вариантов.





«Воздушные» мускулы – одно из наиболее эффективных решений. Они легкие, обладают удовлетворительными скоростными и силовыми характеристиками.

На фото – продукт компании Festo (на фото): полностью скопированная рука с плечом и фрагментом спины. Мышцы своим числом, размером и способом крепления соответствуют аналогичным в живой руке.

Искусственная рука достаточно сильна, а также способна выполнять даже тонкую работу, требующую высокой координации, такую как рисование и письмо. Высокая точность движений достижима, хотя и требует очень сложных механизмов позиционирования с обратными связями, в отличие от электродвигателей.

Строение и механика пневмомышцы предельно просты: это трубка из упругого материала с частично армированными стенками. Там, где стенки не укреплены, они при подаче воздуха под давлением растягиваются, заставляя всю трубку сокращаться в продольном направлении, совершая при этом работу.



**Резюме:** пневматические мышцы наиболее приближенно копируют живые мускулы. Главный недостаток пневмомышц – необходимость в компрессоре для нагнетания воздуха. На сегодняшний день компрессор является внешним двигателем по отношению к силовым единицам. Задача сегодняшнего дня, решаемая инженерами, – повысить управляемость мышцами, которая обеспечивается системой клапанов. На этом поле достигнуты значительные успехи. Но требование завтрашнего дня будет заключаться в избавлении от внешнего двигателя, в достижении автономности и мобильности. Также проблему представляет собой большое количество отработанного воздуха, в настоящее время просто спускаемого из мышцы через клапаны во внешнюю среду.

### Полимерные мускулы

Самым перспективным направлением считается разработка искусственных мускулов на основе электроактивных полимеров (ЭАП).

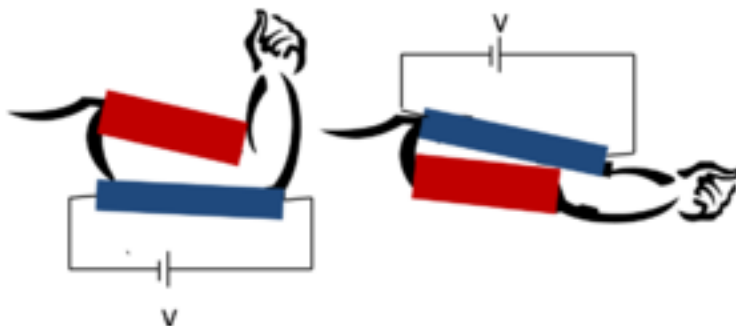
«ЭАП обладают уникальными преимуществами, такими как гибкость, низкая плотность, простота строения, простота обработки, отсутствие акустического шума и, в большинстве случаев, низкая цена» (М. Яблоков, [реферат](#)).

Действующие в настоящее время актюаторы на основе ЭАП сводятся к двум типам:

1. Свернутый в трубку диэлектрический эластомер, который при подаче высокого напряжения сжимается по принципу конденсатора, благодаря чему происходит выдавливание упругого полимера, представляющего собой изоляционный слой конденсатора, и, как следствие, удлинение трубки.

Получается полимерный «толкатель». Но возможно и обратное действие: если убрать напряжение с контактов, растянутый жгут вернется в исходное состояние, совершая при этом полезную работу. Поскольку диэлектрический эластомер почти не потребляет энергию на удержание в сжатом состоянии, то оправданно рассматривать его и как аналог живой мышцы, совершающей работу благодаря сокращению длины.

Благодаря сходству с мышечным волокном (гибкое, со слабой плотностью, электроактивное) типичное представление о его использовании – аналогично мышце в составе тела, прикрепленной к скелету.



Искусственные руки, боровшиеся на соревнованиях в 2005 году, были оснащены именно такого типа мускулами.

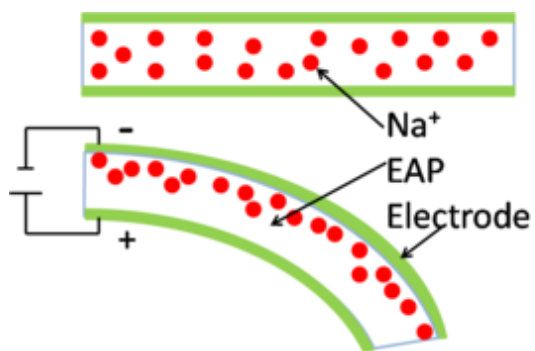
Главный недостаток – недостаточное производимое усилие.

При попытке избавиться от этого недостатка «в лоб», путем подмешивания в полимер веществ с высокой диэлектрической проницаемостью, исследователи сразу столкнулись с противоречием: чем он «сильнее», тем больше вероятность электрического пробоя, т.е. уничтожения изделия, а также сопутствующих повреждений высоким напряжением всего, что окажется поблизости.

Несмотря на более чем десятилетнюю историю исследований, подобная модель искусственной мышцы выглядит довольно «сырой». Как справедливо отмечает М. Яблоков, в этих моделях до сих пор задействованы лишь упругие свойства полимера и не рассматриваются другие, например электрические.

2. Ионный полимер представляет собой пластину, которая изгибается под воздействием электрического тока за счет ионной диффузии. Основные ограничения на использование данного вида полимеров в качестве искусственных мышц – это «неудобный» вид деформации, необходимость в электролитах и потребление сильного тока.

Если мышцу из диэлектрического эластомера можно представить в виде аналога натуральной мышцы, то из ионного – скорее как самостоятельный орган, что и было реализовано в создании хватательного механизма.



**Резюме:** идея использования ЭАП в качестве искусственных мускулов продолжает вызывать интерес, несмотря на существенный недостаток, по которому до сих пор не выработаны убедительные решения, – низкие силовые характеристики. Развитие этих систем представляется как в направлении совершенствования состава полимерных соединений (микроуровень), так и в направлении синтеза полимерных элементов и частей с другими в рамках одной системы (макроуровень).

## **Уровни постановки задач**

### **Уровень мускула – «притягиватель»**

Базовый уровень постановки задачи на разработку искусственной мышцы – по образцу отдельно взятого мускула или мышечного волокна.

Функцию в этом случае можно обозначить так: «притягивание» или «подтаскивание».

В общем виде изделие можно представить себе как устройство, которое, будучи прикреплено к двум точкам, способно притягивать эти точки одну к другой.

Исследования на данном уровне имеют явный бионический уклон. Образ копируемого объекта – живого мускула – заставляет представлять себе удлинённый гибкий предмет, который при воздействии электричества сокращается на 20–30%.

Этот рабочий образ в сильной степени инерционно «заряжен». Поэтому так упорно продолжаются попытки усовершенствовать мускул из диэлектрического эластомера – ведь он «в целом» соответствует поставленной задаче.

Как показал предварительный анализ проблемного поля, работа в этом направлении ведётся более 10 лет и без сколько-нибудь значимых результатов.

Тем не менее, если уточнить и переформулировать задачу на этом уровне, то можно получить новые ценные идеи.

Первый способ постановки задачи – в максимально абстрактной формулировке:

*Функция – перемещение точки в пространстве. Каким образом она может быть реализована?*

Такая задача открывает широкие возможности для поиска новых идей путем использования метода аналогий или мозгового штурма.

Второй способ постановки задачи – взять от существующего варианта, «полимерного волокна», ключевое для уровня свойство – гибкость и относительную легкость, – и при этом дополнить задачу возможностью внесения изменений в конструкцию и состав искусственной мышцы.

### **Уровень морфологического органа – двигательная единица: рычаги – сочленения – мышца**

На этом уровне ведётся большинство разработок, так или иначе касающихся актюаторов – аналогов мышц.

Схематично процесс разработки можно представить так: модель конечности (рука, нога, палец), соответствующая оригинальному органу по основным параметрам – размер, степени свободы, вес, взаимные пропорции. Далее ставится задача заставить ее двигаться в определенном диапазоне.

Как правило, конструирование сводится к прилаживанию известных видов актюаторов под данную модель. Ведется манипулирование размерами двигателя или привода, способами крепления к «костям».

Решения данного уровня отличаются наименьшей инновационностью. Объясняется это, как нам видится, психологической инерцией. Задача перемещения в пределах отдельно взятого органа производит впечатление очень простой и легко решаемой известными средствами. Поэтому в решение собственно этой задачи никто особым образом не углублялся. Установив один из приводов на искусственную конечность, разработчик сразу же приступает к решению задачи более высокого уровня – а именно координации работы смонтированной искусственной конечности при выполнении с ее помощью внешних операций.

Существуют очень убедительные в плане точности, силы и скорости образцы искусственных рук, но возникают сомнения, что эти изделия когда-нибудь смогут работать вне испытательного стенда, так как перенос их в условия реальной эксплуатации (например, в качестве протезов) невозможен с нынешней системой приводов. А разработка новых приводов потребует полной переделки всего изделия.

В связи со всем вышесказанным постановка задачи на уровне «морфологического органа» может оказаться самой плодотворной.

### **Уровень организма – опорно-двигательный аппарат**

Функция: перемещение в пространстве всего организма или отдельных органов относительно друг друга.

Двигатели ASIMO разрабатывались на этом уровне. Их рабочая функция – изменение угловых расстояний в сочленениях. За счет этого реализуются движения робота.

Для выполнения двигательных задач уровня организма могут также использоваться другие типы актюаторов – пневмомышцы, гидравлические приводы (PETMAN), электроактивные полимеры, – но суть остается в сгибании суставов и перемещении рычагов.

На этом уровне акцент смещается с источника движения на систему управления движениями.

С точки зрения ТРИЗ, в соответствии с законом увеличения степени идеальности, хондовский робот принципиально ближе к идеальному результату. Так как скелет – это есть основа, опора того, что, собственно говоря, должно передвигаться, и в ASIMO он впитал в себя мышечную систему, моторную функцию. Его перспектива развития – динамизация, дробление скелета (вплоть до нанороботов и полей). С этой точки зрения очень и очень важное значение имеют разработанная концептуальная и математическая модель движения, а также система управления в целом (ранец ASIMO).

Вероятные ближайшие шаги по пути развития – использование других видов приводов для отдельных органов (двигательных единиц) робота. Например, колени, шея, туловище – стандартные сервомоторы, а руки – на пневмомышцах или полимерах.

Возможен и другой путь к «идеальному скелету» – через полимерные искусственные мускулы. Которые также подвергнутся со временем внутреннему преобразованию, включению системы управления в структуру вещества, а затем – и впитывание опорной

функции. То есть через другой вход – к той же дисперсной моносистеме, быть может, другого типа – «метаморфный» робот. Но для этого следует сразу думать о таком исходе и ставить задачу с дальним прицелом.

Однако в настоящий момент мы имеем задачу по модернизации жгутика, тянущего массивную пассивную кость из произвольного твердого материала.

## **Противоречия в существующих образцах искусственных мышц**

### I. Самодвижущийся сустав

Рассмотрим суставный сервопривод. На уровне мышцы это решение не проявляется, поэтому допустимо оценивать его на уровне двигательной единицы и организма в целом.



Поскольку перемещения организма осуществляются путем изменения положения суставов, то сустав, меняющий свое положение *сам*, без использования внешних сил, – решение, близкое к идеальному.

Единственным существенным фактором расплаты самодвижущегося сгибателя как отдельной двигательной единицы можно считать потребление электроэнергии. Однако на уровне системы двигательных единиц – организма – на первый план выходит такой фактор расплаты, как вес. Развитие двигательных способностей искусственного организма подразумевает увеличение степеней свободы, а следовательно, и количества движущихся сочленений. Добавление узлов увеличивает вес робота и его органов, что в свою очередь требует увеличения мощности двигателей (для большего усилия), а значит – их размеров и опять же веса.

Таким образом на уровне организма мы имеем физическое противоречие:

ФП1: /Сервомоторов должно быть много, чтобы обеспечивать необходимый диапазон движений; и сервомоторов должно быть мало, чтобы не увеличивался вес робота/.

Также подразумевается, что робот кроме способности перемещать самого себя в пространстве должен выполнять полезную работу – поднимать, удерживать, тянуть, перемещать и т.п. Частично этот вопрос решается за счет системы управления движениями: путем использования в качестве рычагов конечностей робота, точного распределения весов по конструкции и учета внешних сил – гравитационных и



инерционных. Но этого недостаточно, поэтому существуют определенные требования к мощности отдельных двигателей. Если мы сокращаем размеры и вес сервопривода, то уменьшаем ее мощность.

На уровне двигательной единицы формулируем техническое противоречие:

ТП1: /Нужно уменьшать размер сервопривода, чтобы снизить его вес, но при этом снижается его мощность/.

## II. Пневмомышца

Чтобы функционировала воздушная мышца, необходим источник сжатого газа. Все современные образцы работают от компрессора или резервуара со сжатым заранее воздухом. Как правило, это массивные отдельно стоящие приспособления, соединенные с мышцей длинными полыми трубками. Если не будет подачи воздуха под давлением, мышца не будет надуваться и тем самым не будет выполнять свою функцию.

Наличие компрессора – это серьезное ограничение для использования пневмомышц в автономных роботах. Поэтому, рассматривая этот вид актюатора на уровне организма, мы формулируем административное противоречие:

АП1 /Перемещения робота ограничены длиной соединительных трубок. Он привязан к компрессору/.

Первое решение – компромиссное – заключается в том, чтобы уменьшить размеры компрессора до степени, при которой робот способен будет сам его перемещать на себе. Идя по этому пути, мы неизбежно столкнемся с потерями мощности, увеличением массы робота. В случае использования переносных сменных баллонов возникнет проблема низкого запаса действия, необходимости частой замены источника сжатого воздуха.

Анализируя на уровне мышцы, мы стремимся полностью избавиться от компрессора. Один из вариантов технического противоречия:

ТП2: /Воздух, давящий на стенки мышцы, должен уходить из нее, чтобы мышца расслаблялась, и не должен уходить, так как в этом случае придется снова его закачивать извне с помощью компрессора, а это недопустимо/.

Идеальный конечный результат – воздух под давлением сам, без компрессора появляется в мышце, когда нужно сократить мышцу, и исчезает, когда нужно расслабить.

## III. Диэлектрический эластомер

Ключевая проблема этого вида актюаторов – необходимость в высоком напряжении. Поэтому разработчики стремятся сделать слой изолятора как можно тоньше. Однако при этом падает производительность – производимое усилие. Скручивание в трубку проблему кардинально не решает.

ТПЗ: /Необходимость увеличения силы изделия требует увеличения толщины слоя полимера, но это приводит к возрастанию требуемого напряжения и повышению вероятности электрического пробоя/.

Вторая проблема – высокая вероятность электрического пробоя при повышении напряжения или добавления в полимер дополнительных веществ. Пробой чреват порчей изделия – сгорает проводящий слой и выжигается полимер.

Снижению вероятности пробоев способствует совершенствование поверхности электродов, однако этот путь имеет естественное ограничение из-за того, что на микроуровне поверхность полимерного слоя, на которой напылен электрод, сама по себе неровная по причине крупных молекул.

Один из путей усовершенствования – способ ликвидации последствий пробоев – самовосстанавливающиеся слои (например, жидкие электроды).

Однако эти дополнения требуют пересмотра самой конструкции, так как в нынешнем виде диэлектрический эластомер не предполагает других видов электродов.

## Определение перспективных направлений разработок

### **Анализ функционального состава актюаторов**

Из таблицы, находящейся ниже, можно увидеть, что разные по внешнему виду, принципам действия, источникам питания и т.д. актюаторы фактически имеют очень ограниченный диапазон типов устройства. Они отличаются:

- 1 типом силы, осуществляющей первичное действие: магнитная, молекулярная (пьезо-), давление жидкости или газа (пневмо-, ДВС, гидро- и т.д.);
- 2 направлением приложения силы. Она либо тянет (магнитная, молекулярные силы, вакуум в шприце и гидравлике) или толкает, в целом – меняет соотношение сил с той стороны точки и с этой, а также действует либо в каком-то направлении или направлениях. Газ и жидкость – во все стороны. Магнитное поле – в полусфере. Механическое давление – по вектору. Вообще – в общем – это так или иначе вектор;
- 3 способом ее передачи (трансмиссией, «рычагом» в общем смысле). Системы типа «раскладывающейся гармошки», пневмомышцы, ионный вариант ЭАП и многие другие типы движителей – это рычаг. Фактически в них происходит движение по одной оси, которое превращается в движение по другой за счет геометрического эффекта – некой инертной «кости». В гармошке это – шарнир с одной степенью свободы, многократно продублированный. Шарнир может быть разным (не только прямой угловой передачей, но возможны и другие варианты шарниров-передач, например, пружина, которая расходится в стороны при давлении сверху, а не просто сплющивается);
- 4 наличием мультипликации – система либо одна (ДВС), либо много (пьезоэффект).

Таблица 1. Функциональные части систем – актюаторов

	Источник энергии	Двигатель	Способ передачи	Трансмиссия	Рабочий орган	Орган управления
<b>«Суставный» сервопривод</b>	энергия из аккумулятора	магнитное поле катушки, притягивающее ротор	вращение якоря (переменное притяжение во вращение)	гармонический редуктор	поверхность редуктора	контроллер тока
<b>Пневмомышца</b>	резервуар со сжатым воздухом или компрессоры	газ, давящий на стенку	стенки, превращающие давление в перпендикулярное перемещение		верхняя часть стенок – редуктора	контроллер давления, система клапанов
<b>Жгут из диэлектрического эластомера</b>	энергия из аккумулятора	магнитное поле обкладки, притягивающее другую обкладку	полимер + обкладка, превращающие давление по одной оси в движение по другой		верхняя часть полимерного батона	контроллер напряжения
<b>«Хвататель» из ионного полимера</b>	энергия из аккумулятора	давящая на стенку жидкость	стенка, превращающая давление в угловое перемещение (надо понимать, что это полный аналог половины пневмомышцы)		верхняя часть стенки – редуктора	контроллер тока
<b>Цилиндр ДВС</b>	резервуар с бензином	давящий на стенку газ	стенка, отражающая давление перпендикулярно	поршень, передающий давление	верхняя часть поршня	контроллер впрыска
<b>Соленоид</b>	энергия из аккумулятора	поле, тянущее якорь	ферромагнитный якорь, принимающий притяжение под 45% и передающий его на свой конец		верхняя часть якоря	контроллер тока
<b>Биологическая мышца</b>	энергия аккумулятора	химическая связь миозина с актином	мостик, поворотом превращающий силу хим. связи в перемещение двух белков	повторение во множестве систем	верхняя часть белка миозина	ферменты
<b>Пьезодвигатель</b>	энергия	электрическая связь ионов	перемещение ионов под воздействием электрической силы	повторение во множестве систем	верхняя часть материала – решетки	контроллер напряжения

Фактически самой разнообразной частью системы является система передачи. Именно она порождает разные на вид решения, являющиеся синонимичными с точки зрения принципиальной схемы.

Так, например, ионная ЭАП-мышца и пневмомышца реализуют один и тот же принцип – превращение расширения во все стороны – через свойства упругой стенки в перемещение связанной со стенкой рабочей точки.

**В пневмомышце** роль шарнира выполняет оплетка (на микроуровне волокна ту же функцию выполняют, перераспределяя силы за счет сходных геометрических эффектов).

**В ионном варианте ЭАП** используется обратный эффект. Роль шарнира выполняет граница между двумя полимерами. Рабочий – тот, который расширяется. Сила прилагается не снаружи, а изнутри, при том что общий эффект аналогичен. Это аналог пневмомышцы, у которой оплетка существует только с одной стороны. Соответственно, если создать из ионной ЭАП-мышцы-реципиента армированную вертикально трубку, внутри которой будет находиться материал-реципиент, аналогия станет полной – с той разницей, что расширение внутреннего пространства происходит в одном случае при помощи повышения давления воздушным компрессором, а в другом – ионным дрейфом из оболочки под воздействием приложенного электрического поля.

**В цилиндре ДВС** передача взрыва топлива, сила которого направлена в разные стороны, также направляется в одну сторону стенками. Однако там другая геометрия рычага, стенки перенаправляют давление в торец цилиндра, просто отражая силу взрыва в сторону подвижного поршня.

**Соленоид.** Тут происходит затягивание магнитом, причем под углом в 45 градусов, хотя КПД при этом падает, но работа совершается. Толкание не существует, хотя, наверное, можно реализовать, если сердечник сделать из другого электромагнита или постоянного с тем же знаком.

Перемещение рабочей точки под воздействием **электромотора**, который через передачу кручение превращает в толкание.

**Пьезоэлектрический эффект** (обратный). На микроуровне – одной кристаллической ячейки – происходит смещение одного кристалла относительно другого за счет толкания, в котором рычагом приложения силы является, видимо, разновидность ионных связей. То есть в случае пьезоэффекта нужно рассматривать одну кристаллическую ячейку.

**Живая мышца: нити актина** скользят среди нитей миозина под действием сил, генерируемых при взаимодействии поперечных мостиков, исходящих от нитей миозина, с нитями актина. В условиях покоя эти силы не проявляются, однако распространение потенциала действия вдоль мышечного волокна приводит к выделению из саркоплазматического ретикулума большого количества ионов кальция, которые окружают миофибриллы. В свою очередь, ионы кальция активируют силы взаимодействия между нитями актина и миозина, и в результате начинается сокращение. Для осуществления процесса сокращения необходима энергия. Ее источником являются высокоэнергетические связи молекулы АТФ, которая разрушается до АДФ с высвобождением энергии. Фактически *миозин «ползет» вдоль нескольких нитей актина, отталкиваясь от них «ножками»-мостиками «множественно», т.е.*

*«толкнул, отцепился, пошел назад, снова прицепился и снова толкнул». Нить вползает в трубку из других нитей как сороконожка, отталкиваясь «лапками»-мостиками. На микроуровне одна «ножка»-мостик совершает один «шаг» движением, похожим на движение дворника автомобиля.*

## **Морфологический анализ актюаторов**

Ниже приведен перечень принципов и эффектов, обеспечивающих работу разных типов актюаторов. Комбинации этих позиций формируют множество принципиальных моделей, которые должны быть оценены с точки зрения применимости в качестве искусственных мускулов.

### **Источник энергии**

- энергия горения бензина,
- энергия сжатого воздуха,
- электроэнергия,
- энергия в химических связях (АТФ),
- энергия взаимодействия ионов в кристаллической решетке (а также аналогичные эффекты в электретах разного типа).

### **Преобразование в силу через поле**

- механическое,
- акустическое,
- тепловое,
- химическое,
- электрическое,
- магнитное.

### **Сила**

- кручение,
- толкание,
- притяжение,
- распираание,
- схлопывание.

### **Уровень**

- макро-,
- микро-,

- нано-.

### **Передача**

- кручения в толкание,
- кручение в притяжение,
- кручения в распираение,
- кручение в схлопывание,
- притяжения в толкание,
- притяжения в кручение,
- притяжения в распираение,
- притяжения в схлопывание,
- толкания в притяжение,
- толкания в кручение,
- толкания в распираение,
- толкания в схлопывание,
- схлопывания в кручение,
- схлопывание в толкание,
- схлопывания в притяжение,
- схлопывания в распираение,
- распираения в кручение,
- распираения в толкание,
- распираения в притяжение,
- распираения в схлопывание.

Все рассмотренные нами варианты актюаторов находятся на пересечении осей, образованных данными списками.

## **Модификация существующих решений**

Путем приложения приемов и принципов ТРИЗ к существующим решениям получены идеи новых типов искусственных мышц.

### **Переход на микроуровень**

*Варианты модификации ЭАП, пневмомускулов, ДВС на микроуровне – «пенная мышца», мышцы с изменением фазового состояния вещества.*

- 1 Пузырьки, расширяясь в ограниченном пространстве, выдавливают полимер вдоль ограничителей.
- 2 Пузырьки, схлопываясь, уменьшают его размер.
- 3 Пузырьки или трубки, расширяясь в пространстве, превращают трубки в шарики, стягивая крайние точки.
- 4 Электропроводные ленты, диски или сферы, притягиваясь друг к другу, выдавливают материал в поперечной плоскости.
- 5 Электропроводные ленты, диски или сферы, притягиваясь друг к другу через пузырек, сжимают материал в плоскости притяжения.
- 6 Молекулярный вариант этого микроэффекта.
- 7 Микропоршень на уровне микроволокон или молекулярных цепей.
- 8 Передача энергии на шарик для выполнения работы по армирующей электропроводной линии.
- 9 Взрыв газа – подрыв ЭМ-излучением, током, напряжением, акустическим воздействием (акустическая кавитация), другим способом локального ускорения (аналог гидрокавитации) и перехода материала на волне сжатия или разрежения в другую фазу. При схлопывании образуется ударная волна как источник энергии. Схлопывание – падение внутреннего давления, например переход содержимого в другую фазу (конденсация). Можно использовать силу схлопывания или его производное – ударную волну. Дополнительный вопрос – как обеспечить восстановление газа.
- 10 Электретный принцип. Пример – «слоистый пирог» из микроэлементов со свойствами электретов.
- 11 Сжатие, как со жгутиковым ЭАП. Поместить внутрь материала микроэлементы, которые реагируют на воздействие, например ферромагнитные спиральки, диски, плоские ленты и т.д. Они будут притягиваться друг к другу, создавая микроэффекты, аналогичные макроэффекту большой мышцы.
- 12 Пузыри могут создаваться не кавитацией, а заранее, причем в запланированных местах, используя помещенные диски для фокусировки ультразвука или локального нагрева. В итоге имеем пузырек с диском или двумя в качестве обкладок. Локализация и ориентировка дисков – либо формой (погружение



тарелки), либо за счет магнитной ориентации в расплаве полимера. Можно заложить пустые пространства (пузырьки) не круглыми, а вытянутыми – аналогами трубок. Тогда при наполнении они будут стягивать дальние точки, так как будут стремиться принять форму шара. Можно заложить трубочки, которые растворятся, растягивать шарики во время застывания, заложить ворсинки металла, вокруг которых потом сформировать (выжечь микроволнами, создать акустическим разрывом или химически [пары зерна, которые при воздействии силы  $X$  дадут реакцию горения или увеличения объема]) вытянутые полые закрытые «трубочки».

- 13 Молекулярный вариант. Заранее сжатые кольцевые или шарообразные молекулы (а-ля бензол или фуллерены) восстанавливают форму при резонансном ЭМ-воздействии, совершая при этом механическую работу.
- 14 Вариант по образцу ДВС. Расширение шарика (или его сжатие) сделать избирательно воздействующим только на часть окружающего полимера, например на микропоршни – жесткие элементы арматуры – «елочки», которые передадут расширение дальше, чем просто изменение объема шарика, которое будет гаситься упругостью полимера. Соответственно, для этого нужно сделать воздействие избирательным, отличающим «арматуру-поршни» от окружающего материала. Как вариант – делать не диски металлические, а вариант «диск + длинная цепочка-елочка».
- 15 Молекулярные эффекты – цепочки, вкручивающиеся или входящие за счет аналога капиллярного эффекта (густеющая жидкость, в которой верхняя часть достаточно жидкая, чтобы подчиняться капиллярному эффекту под управлением ультразвука, а нижняя – достаточно густая, чтобы тянуть часть материала с собой). Наоборот – делать шарики «солнышками» – пространством, куда будут втягиваться по трубкам микропоршни, возможно, состоящие из жидкости или полимера другого типа.
- 16 Микропоршни можно объединить с микродисками, рядом с которыми создается пузырек или полая микротрубочка, таким образом – в материал погружаются нити, состоящие из «гармошки». В определенных местах мы подрываем эти микротрубочки (либо исходя из того, что подрыв может осуществиться где угодно, либо закладывая закладки, реагирующие на воздействие избирательно), расширяя эту трубочку до шарика с нитями вокруг. Подобие «фонарика» из бумаги – трубочка с разрезами. Если разрыв сделать полным, то у нас получаются нити, ведущие с двух сторон материала вовнутрь, и мы сможем создавать внутри нужный эффект (обратный – диэлектрик – воздух или газ внутри шарика, упругость дает материал снаружи, а не внутри).
- 17 Если нити – трубки изначально имеют спиральную структуру, то на оболочке шарика можно получить спиральку – электромагнит и стягивать его части электромагнитным эффектом.
- 18 Если вместо шарика изготовить трубочку (цепочку слившихся шариков), то можно получить микросоленоид, который, если оборвать его, мог бы втягивать якорь. На ступень выше к макроуровню – просто гибкие соленоиды из электропроводного полимера с «колбасками»-якорями внутри них.

*Варианты модификации ионных полимерных актюаторов*

- 1 Преобразовать тип движения в сокращение. Сделать из материала-рецептора цилиндр. Из материала-донора – оболочку цилиндра. При увеличении внутренней части и при условии армирования оболочки эффект будет, как с пневмойшей.
- 2 Ускорить миграцию ионов. Ионы переходят долго, и чтобы достичь эффекта, нужно увеличить площадь проникновения. Самый простой способ – перенести эффект на микроуровень. Варианты: а) взаимопроникающие ворсинки; б) ячейки-элементы.
- 3 Внесение шариков донора в пространство реципиента и наоборот – задача превращается в описанную выше модификацию мышц ЭАП + пневматика.

## Приоритетное направление исследований

Согласно наблюдению М. Яблокова, в 2012 году исследования в области искусственных мышц на основе ЭАП заметно активизировались. Можно говорить о новом всплеске интереса к проблеме. При этом большинство новых разработок сводится к применению геометрических эффектов к диэлектрическому эластомеру на макроуровне, оставляя неизменным его базовое «конденсаторное» устройство. Поиск решений на микроуровне – закономерный этап в развитии технических систем, к которому обязательно придут зарубежные исследователи. Поставив перед собой задачу таким образом, мы действуем с опережением.

По итогам обсуждений проблемного поля было определено направление для дальнейшей теоретической и экспериментальной проработки.

***Модификация принципа ЭАП (диэлектрического эластомера) путем дробления (переноса на микроуровень) генераторов поля, помещения их в упругую среду полимера и эксплуатация мультипликативного эффекта деформации.***

### Описание задачи

#### Общее представление:

В массе полимера находится множество элементов, способных притягиваться друг к другу, тем самым меняя его структуру и форму. Элементы притягиваются друг к другу под воздействием силы X, отталкиваются под воздействием силы Y.

В качестве силы X рассматриваем:

- 1 притяжение разноименных электрических зарядов:
  - a заряд придается элементам извне,
  - b постоянный заряд – электреты.
- 2 [эффект Казимира](#).

#### Вариант 1: Заряжаемые элементы

В расплавленный полимер погружаются частицы, изготовленные из вещества, способного накапливать электрический заряд.

Подзадача: выбор вещества, размера и формы элементов

Подзадача: взаимное расположение элементов при сплавлении в полимер

Заряд создается разноименным для разных групп элементов, расположенных вдоль оси, по которой осуществляется сокращение.

Способы придания частицам заряда:

- помещение в поле коронного разряда,
- в электромагнитное поле.

Получившие заряд элементы притягиваются, выдавливая и деформируя полимер сходным образом с диэлектрическим эластомером. Сочетание локальных деформаций должно приводить к нужному макроэффекту (сокращению мышцы).

Подзадача: расчет требуемой механики и геометрии деформации

Подзадача: расчет формы элементов (пластины, диски и т.п.)

После срабатывания силы притяжения и совершения работы требуется вернуть элементы в исходное положение (сила  $Y$ ):

- упругость материала возвращает материал в исходный вид после снятия силы  $X$ ;
- заряженным элементам придается одноименный заряд, что вызывает их отталкивание;
- для расталкивания используется расширение пузырьков в материале за счет активации специальным воздействием;
- используется эффект, обратный эффекту появления заряда на полимере в результате его растяжения.

### Вариант 2: Электреты

Электреты представляют собой носители постоянного заряда; таким образом, элементы, помещенные в полимер, с самого начала обладают силой, обеспечивающей их притяжение.

Для того чтобы обеспечить сближение элементов до расстояния, на котором силы начинают действовать, элементы с самого начала располагаются на таком расстоянии. При этом их разведение никогда не применяется по отношению ко всем элементам, а оставшихся, на которые силы действуют, достаточно для того, чтобы стянуть соседние. Таким образом, нормальное состояние такой мышцы – «постоянно сокращенное».

Подзадача: расчет расстояния между электретами

Подзадача: способ вплавления электретов в полимер

В случае использования электретов видоизменяется задача снятия силы притяжения – она приобретает приоритетное значение. Один из способов –

- раздвигать элементы на нейтральное расстояние путем управления объемом располагающихся между ними «пузырьков».

### Вариант 2: Эффект Казимира

Данный эффект заключается во взаимном притяжении незаряженных поверхностей, если они располагаются на расстоянии от 10 нм до 1 микрона. Объясняется это свойствами вакуума, а в практическом смысле означает «дармовую» энергию.

Для проведения эксперимента решено использовать графитовые пластинки (в перспективе – из графена), скрепленные полимером.

*Главная задача, которую следует решить, заключается в нахождении способа расположить пластинки параллельно друг другу на требуемом расстоянии.*

Для этого можно использовать в качестве калибровщика излучение с длиной волны, равной требуемому расстоянию, а выпрямлять с помощью магнитного поля.

Чем меньше расстояние между пластинами, тем больше сила притяжения. Отключение же силы возможно с помощью излучения (подсветки), т.е. сообщения энергии в интервал, из-за которой пластины раздвигаются на расстояние, большее, чем то, на котором сила Казимира способна преодолеть упругость материала.

## Выводы

Разработка искусственных мускулов – очень молодая область знаний. Несмотря на родство с такими техническими системами, имеющими долгую историю, как двигатели и актюаторы, мы не можем напрямую причислить к ним искусственные мускулы.

Наличие значительного количества специфических требований и ограничений заставляет выделять их в качестве отдельной технической системы.

Анализ истории вопроса показал, что когда нужно было смоделировать функцию мышц (как правило, начиналось все с функции сгибания и разгибания сустава), чаще всего разработчики останавливались на одном из известных типов актюатора, который приспособляли под искусственную конечность. Если актюатор работал удовлетворительно (мог менять положение сустава), его оставляли и переходили к решению задач на уровне искусственного тела – автономного робота. Но на этом уровне накапливаются противоречия, не решенные на прошлом уровне, и возможности развития всей системы резко ограничиваются – так, например, современный ASIMO фактически способен нести лишь собственный вес, а PETMAN не уйдет далеко от питающего его движением компрессора.

Получается, что развитием собственно искусственной мышцы в действующих моделях роботов или отдельных конечностей практически никто непосредственно не занимается. Быстрым темпом идет совершенствование систем управления движениями, но те части системы, благодаря которым рождается движение, остаются на архаичном уровне.

Отдельным направлением выделяется разработка искусственных мышц на основе электроактивных полимеров. Полимеры очень привлекательны в качестве заменителей мышц ввиду низкой плотности, дешевизны, легкости, способности самостоятельно менять форму под воздействием электричества и т.п.

Но несмотря на перспективность ЭАП, на их основе пока невозможно создать даже модель конечности, так как они не обеспечивают достаточного усилия. Разработчики ЭАП находятся во власти психологической инерции и продолжают вносить мелкие изменения в первоначальное устройство полимерного мускула, но без особого успеха.

Сделав подробный анализ подходов к созданию искусственных мышц, мы пришли к выводу, что необходимо поставить задачу о разработке принципиально нового типа силовых актюаторов, но с использованием базовых преимуществ полимерной структуры.

Рассматриваемая исходная техническая система – автономный силовой «притягиватель».

В данной работе проанализированы и разобраны по функционально-морфологической структуре основные из известных искусственных аналогов мышц. Обозначены линии и перспективы развития, выделены противоречия, которые тормозят развитие систем и нуждаются в разрешении.

Путем применения методов мозгового штурма, аналогий и др. предложены идеи искусственных мышц на основе принципиально новых моделей, а также объединения и переноса преимуществ разных видов рассмотренных актюаторов на микроуровень.

В качестве направления собственных разработок были выбраны модели с использованием принципа диэлектрического эластомера на микроуровне и эффекта Казимира на наноуровне – путем вплавления взаимодействующих элементов в массу упругого полимера.

