

33

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**УТВЕРЖДАЮ**

Председатель СПбНЦ РАН  
академик

  
Ж. И. Алфёров



**ОТЧЕТ**

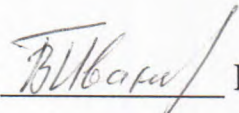
о научно-исследовательской работе  
**«Поисковых исследований возможности создания  
исполнительных устройств робототехники и автоматики  
на электроактивных полимерных материалах»**

(промежуточный)

по Государственному заданию СПбНЦ РАН в 2014–2016 гг. п.36.1

Этап 1

Ответственный исполнитель

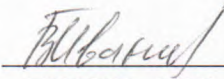
к.т.н. доцент  В.П. Иванов

Санкт-Петербург

2014

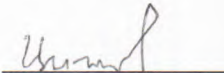
## Список исполнителей

Ответственный исполнитель  
темы, старший научный  
сотрудник, кандидат  
технических наук, доцент

  
\_\_\_\_\_  
подпись, дата  
09.12.2014

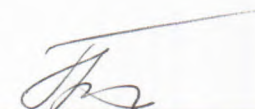
В.П. Иванов

Исполнитель темы, старший  
научный сотрудник, кандидат  
технических наук

  
\_\_\_\_\_  
подпись, дата  
09.12.2014

И.А. Цыганкова

Нормоконтролер

  
\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Г.С. Боброва



## РЕФЕРАТ

Отчет 29 с., 14 источников

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автоматика, робототехника, управление, исполнительные устройства, электроактивные полимеры, искусственные мышцы.

Объектом исследования являются исполнительные устройства.

Целью НИР является: повышение эффективности управления сложных устройств робототехники и автоматики, в том числе микро и наноуровня, за счет использования электроактивных полимерных систем в исполнительных устройствах.

Данная цель может быть достигнута на основе разработки соответствующих электроактивных полимерных систем, новых принципов построения исполнительных устройств, использующих электроактивные полимерные системы.

В отчете приведены результаты анализа современных подходов к построению исполнительных устройств автоматики и робототехники. Показано, что в ряде случаев, особенно в микро- и наноисполнении, исполнительные устройства в традиционных схемных решениях не могут обладать надлежащей эффективностью либо не выпускаются промышленностью в соответствующем ассортименте. Одним из возможных путей решения указанной проблемы является использование исполнительных устройств на новых электроактивных полимерных материалах.

Рассмотрены некоторые устройства на электроактивных полимерах.

Обоснованы требования к исполнительным устройствам на электроактивных полимерных системах, требования к соответствующим полимерным материалам, проанализированы подходы к синтезу схем построения устройств робототехники и автоматики на электроактивных полимерных материалах.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
Глава 1. Проблемы создания исполнительных устройств на электроактивных полимерных материалах .....	10
1.1 Анализ существующих подходов, методов, принципов построения исполнительных устройств с использованием электроактивных полимерных систем .....	10
1.2 Анализ характеристик существующих электроактивных полимерных систем с точки зрения пригодности для создания на их основе исполнительных устройств .....	15
Глава 2. Обоснование схемных решений исполнительных устройств на электроактивных полимерных материалах .....	17
2.1 Обоснование требований к исполнительным устройствам, использующих электроактивные полимерные системы .....	17
2.2 Требования к электроактивным полимерам и оценка возможности создания электроактивных полимерных систем с заданными свойствами .....	19
2.3 Определение возможных схемных решений построения исполнительных устройств, использующих электроактивные полимерные системы .....	21
Заключение .....	28
Список использованных источников .....	29



## ВВЕДЕНИЕ

Развитие автоматики, робототехники, в том числе в мини- микро- и наноисполнении, настоятельно требует создания исполнительных устройств соответствующего уровня.

К настоящему времени отработаны и внедрены в производство электромеханические исполнительные устройства, осуществляющие как вращательное, так и поступательное движение. Как правило, они состоят из электродвигателя (асинхронного, переменного и постоянного токов), статор которого расположен по окружности или развернут в линию. Соответственно, якорь в первом случае осуществляет вращательное движение (электродвигатели вращения), во втором – линейное перемещение относительно статора (линейные электродвигатели). При применении линейного двигателя иногда используют рычажные механизмы масштабирования движения. В случае использования электродвигателя вращения устанавливается переходная муфта (в том числе электромагнитная, порошковая и т.д.), и редуктор. При необходимости монтируется устройство для преобразования вращательного движения в поступательное. В последнем случае чаще всего используются рычажные, винтовые, шариковые или плоскошестеренчатые механизмы.

Достаточно часто применяются пневматические исполнительные устройства, работающие от аккумулятора давления или (через ресивер) от компрессорных агрегатов, приводимых в движение поршневыми, турбинными или электрическими машинами различных типов.

Внедрены в производство и гидравлические исполнительные устройства поршневого типа для линейного движения, аксиально-поршневые или радиально-поршневые машины, турбины различных типов для вращательного движения. В них жидкость подается под давлением с использованием аккумуляторов давления, насосных агрегатов различного



типа, которые приводятся в действие поршневыми, турбинными и электрическими машинами.

Все указанные выше устройства реализуют тяговые усилия (при поступательном движении) в достаточно широком диапазоне от 10 до 1000000 н.

Одним из перспективных и приоритетных направлений развития современной робототехники является создание роботов мини-, микро- и наноуровня геометрических размеров.

Разработка и производство таких роботов сопряжены с рядом трудностей. К их числу относится ограниченный сортимент выпускаемых исполнительных устройств в указанном диапазоне геометрических размеров и технических характеристик. Помимо организационных и производственных аспектов эта проблема имеет определенные физические и химические ограничения.

С уменьшением геометрических размеров энергетическая эффективность исполнительных устройств в традиционном исполнении неизбежно падает. Это связано с тем, что с уменьшением геометрических размеров все большее значение приобретают силы молекулярного сцепления, и с некоторого уровня они превышают силы трения, а при дальнейшем уменьшении размеров силы молекулярного сцепления начинают разрушать материал (металл).

Отметим, что интегральные физико-механические и химические характеристики конструкционных материалов (в том числе твердость, пластичность, химическая стойкость и др.) с уменьшением геометрических размеров также меняются, так как возрастает роль их относительной структурной и химической неоднородности и анизотропности.

Отметим также, что с уменьшением геометрических размеров исполнительных устройств в традиционном исполнении ряд физических ограничений преодолеть невозможно. Например, при уменьшении геометрических размеров для получения необходимой электродвижущей



силы обмотки электродвигателей, реле и др. приходится выполнять все более и более тонким проводом. Однако при этом резко возрастает его омическое сопротивление и при дальнейшем уменьшении размеров это приводит к плавлению провода. К тому же для изготовления механических деталей в микро- и наноразмерах практически отсутствует необходимый станочный парк.

Поэтому при создании исполнительных устройств в микро- и наноисполнении приходится прибегать к нетрадиционным методам их синтеза за счет отказа от традиционного построения исполнительных устройств и переходе к исполнительным устройствам на иных принципах. Например, применять так называемые «конденсаторные» двигатели – пластинки, колеблющиеся в переменном электростатическом поле, с подачей потенциала на них предельно короткими и относительно толстыми проводниками, а также биметаллические пластины, меняющие свою форму под воздействием тока (см. [1]).

Еще одним сравнительно новым направлением решения указанной проблемы является применение полимерных материалов, называемых иногда «искусственными мышцами».

Существует несколько классов полимерных материалов, способных изменять свою форму, геометрические размеры, физикомеханические характеристики под внешним воздействием.

Отметим, что, ввиду относительной новизны исследований в данном направлении, терминология «искусственных мышц» еще не сложилась. В ГОСТе (см. [2]) исполнительные устройства на электроактивных полимерах не прописаны, соответствующая терминология отсутствует. Иногда к полимерным мышцам относят конденсаторные исполнительные устройства, в том числе и представленные на рис.1, лишь только потому, что в них использован полимерный материал и что изменение формы происходит под действием электрического заряда.

По-видимому, подобные устройства относить к полимерным искусственным мышцам не правомочно, так как по своей сути они



представляют собой разновидность известных конденсаторных исполнительных устройств, которые можно выполнить по представленной схеме из других материалов, например, из подпружиненной герметичной ткани, резины и т.д.

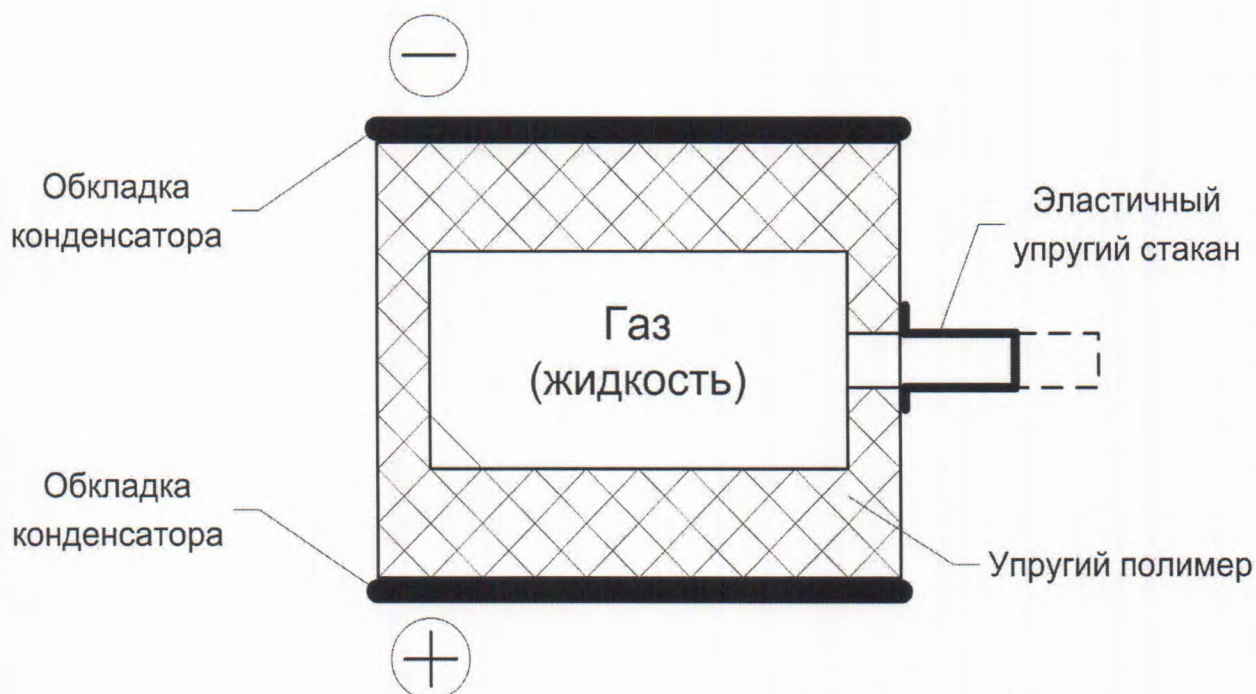


Рис.1. Пример конденсаторного исполнительного устройства с использованием полимерных материалов

Поэтому будем понимать под полимерными искусственными мышцами такие полимеры, которые изменяют электрофизические (в широком смысле, включая и геометрические) характеристики под внешним воздействием.

На изменение электрофизических характеристик могут влиять: изменение pH среды, воздействия электрическим током (напряжением), лазером и др.

Теория синтеза искусственных мышц на полимерных материалах еще не сложилась, широкая практика их применения неизвестна.

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы показывает, что полимерные искусственные мышцы еще делают первые шаги в сфере синтеза полимерного материала с соответствующими свойствами, а также разработки конкретных конструкций на их основе,



моделирования, расчетов. Сфера их рационального применения и эксплуатации не выявлена.

Поэтому на первом этапе необходим комплекс поисковых НИР, направленных на: а) поиск путей синтеза полимерных материалов с заданными свойствами для «искусственных мышц», б) разработку схем исполнительных устройств конкретного назначения. На втором этапе необходим комплекс соответствующих ОКР, на третьем – общих методик синтеза исполнительных устройств и методов их расчета, на четвертом – уточнение сфер применения, обобщение опыта эксплуатации.

## **1. Проблемы создания исполнительных устройств на электроактивных полимерных материалах**

### **1.1 Анализ существующих подходов, методов, принципов построения исполнительных устройств с использованием электроактивных полимерных систем**

В общем случае исполнительное устройство осуществляет преобразование одного вида энергии (часто электрической) в другой (например, механической). Это же относится и к исполнительным устройствам на электроактивных полимерных материалах.

Выделим параметры полимеров, на основе изменения которых под внешним воздействием можно строить исполнительные устройства «искусственные мышцы»:

- 1) изменение геометрических размеров (линейных и угловых), объема и формы полимерного материала;
- 2) изменение оптической прозрачности материала;
- 3) изменение проводимости.

Рассмотрим подходы, основанные на первой группе.

Пластики, изменяющие форму под действием электрического поля, обычно делят на два класса: ионные и электронные. Каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками.

Ионные электроактивные полимеры включают в себя полимерные гели, полимерметаллические композиты, набухающие полимеры, проводящие полимеры и углеродные нанотрубки. Их действие основано на электрохимии — движении или диффузии заряженных ионов. Причем даже небольшое напряжение приводит к значительной деформации.

Такие материалы используют жидкости или жидкие электролиты, что, по мнению некоторых экспертов, является их недостатком. Поэтому при синтезе устройств жидкости или жидкие электролиты приходится заключать в герметичную оболочку, часто в эластичную и растягивающуюся. Отметим,



что при превышении напряжения сверх определенного уровня, начинается электролиз, необратимо повреждающий материал [3-5].

Электронные электроактивные полимерные «мускулы» — такие, как ферроэлектрические полимеры и электрострикционные эластомеры — приводятся в действие электрическим полем высокого напряжения. Поэтому здесь требуются особые источники питания и эффективная защита от случайного удара током. С другой стороны, «мышцы», построенные на этих материалах, отличаются высоким быстродействием и значительными механическими усилиями.

Многие диэлектрические эластомеры (класс изолирующих электроактивных пластических материалов), такие как силиконовые и акриловые пластики, под действием высоковольтного электрического поля сжимаются вдоль силовых линий и расширяются перпендикулярно им. Это явление носит название максвелловской деформации. Оно известно давно, но обычно рассматривалось как побочный эффект. И только в последнее время началось изучение сфер практического применения максвелловской деформации.

Исполнительные устройства в рамках этой группы могут быть выполнены в виде конденсаторных двигателей, состоящих из упругого эластичного полимера-диэлектрика с токопроводящими обкладками, в качестве которых применяется мягкий полимерный материал с внедренными в него проводящими углеродными частицами. Такие обкладки фактически представляют собой эластичный электрод, который может расширяться вместе с пластиком. Конденсаторные элементы могут складываться в «бутерброды», что позволяет повысить уровень деформации до 400 процентов.

Такие элементы можно изготавливать в виде пространственных пружин. Тогда под действием напряжения они могут садиться, либо раздвигаться, совершая работу. Для защиты от высокого напряжения пружины помещаются в гибкие или гофрированные стаканы из диэлектрика.



В электрострикционные полимеры, такие, как полиуретан или силикон, углеводородные молекулы образуют полукристаллические структуры, обладающие пьезоэлектрическими свойствами [6].

Первые исполнительные устройства с использованием полимерных материалов («искусственная мышца»), пригодные для практического применения, пусть даже и в ограниченном масштабе, были созданы на основе полиуретанов и силиконов.

Известно, например, что обычные полиуретаны под воздействием напряжения способны давать небольшую усадку (до 5%) от первоначальных размеров. Введение в их состав специальных добавок (допантов), придание им анизотропных свойств путем предварительного растяжения позволяют эту усадку существенно увеличить. На базе подобных материалов созданы схемы некоторых исполнительных устройств.

Часто исполнительное устройство, использующее полиуретаны, выполняется в виде тонкого полимерного стакана, надетого на оправку, и растянутого пружиной. Отбортовка стакана крепится к основанию металлическим кольцом. К кольцу и оправке подводится напряжение (см. рис.2), под воздействием которого стакан «садится», уменьшая свою высоту.

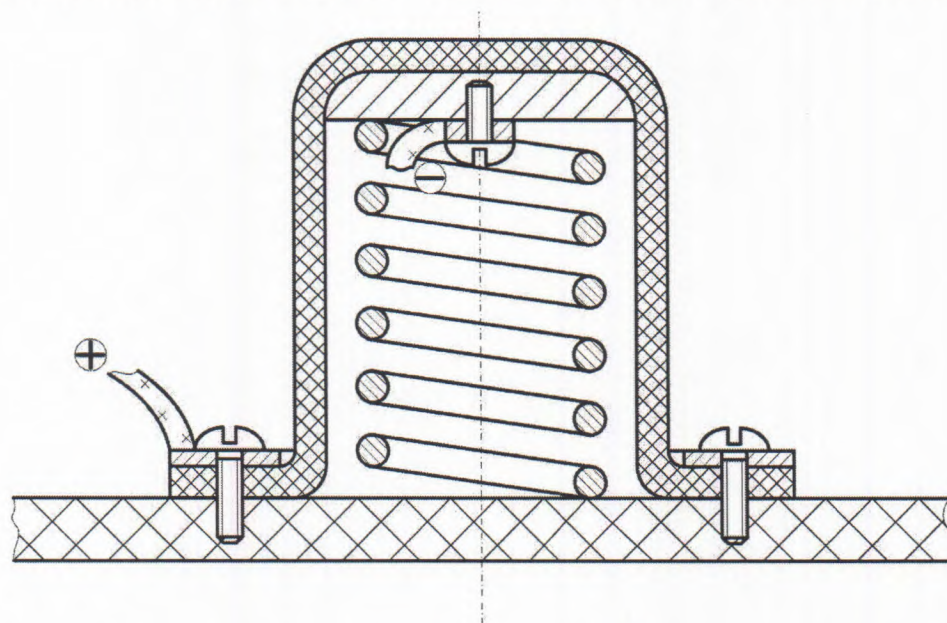


Рисунок 2. Одна из возможных схем исполнительного устройства на полиуретанах.



Когда напряжение сброшено, пружина возвращает стакан в первоначальное положение. Несмотря на высокое напряжение (350-500 в), потребляемый подобными конструкциями ток достаточно мал.

Если разделить стакан на полиуретановые секторы, соединенные друг с другом каким-нибудь эластичным изолятором (например, резиной) и к каждому сектору подводить свое управляемое напряжение, то вершина стакана может осуществлять пространственное движение.

Разработчики искусственных мышц на графеновых нанотрубках заметили, что для их успешной работы исключительно важна одинаковая ориентация нанотрубок. Но такое же упорядоченное расположение полимерных волокон характерно и для многих обычных пластмасс, например, нейлона (капрона). Эксперименты показали, что скрученное из сверхтонких капроновых нитей волокно способно сокращаться под действием тепла в половину своей длины, развивая мощность в 5,3 киловатта на килограмм собственного веса [7].

Еще одним сравнительно новым классом полимерных материалов (первые образцы появились в 1977 году), на которых возможно строить исполнительные устройства, являются полимеры с переменной проводимостью. К ним, в частности, относятся полиацетилен, частично окисленный молекулярным йодом, полипиррол, окисленный в ацетонитрильном растворе с перхлоратом тетрабутиламмония и др.

При изменении потенциала электрода такие полимеры переводятся из проводящего (окисленного) состояния в непроводящее (восстановленное).

Так как такие состояния иногда называются редокс-состояниями, то полимеры, их реализующие, часто называют редокс-полимерами.

Большинство из известных к настоящему времени редокс-полимеров представляют собой металлокомплексные соединения, получение которых, как правило, осуществляют путем электрохимической полимеризации исходных мономерных комплексных соединений.



Одной из особенностей редокс-полимерных пленок является их способность изменять свои оптические характеристики, в частности цвет, при изменении уровня окисления. Если уровень окисленности полимера регулируется потенциалом электрода, на который этот полимер нанесен, оптическими характеристиками полимера можно управлять с помощью электрического сигнала — проявляется так называемый электрохромный эффект.

Полимеры, обладающие такими особенностями, можно использовать как в устройствах управления цветом, так и (при определенных условиях) в оптических затворах [8].

На редокс-полимерах возможно создание электрохимического транзистора с различными видами управления и иных схем исполнительных устройств на его основе.

Еще одна группа новых материалов — так называемые магнитные эластомеры — могут использоваться для изменения размеров и формы под действием внешнего магнитного поля.

В качестве полимерной основы магнитных эластомеров часто применяют: высокомолекулярные каучуки, жидкие каучуки, термоэластопласты, термопластичные материалы (полиолефины, полиамиды, полистирол), полиуретаны, полиэфиры, фенолформальдегидные смолы, полиизобутилен; пластифицированный поливинилхлорид [9-12].

Конкретные схемные решения применения этих полимеров, за исключением управления светофильтром, не известны.

Отметим, что электронные электроактивные полимеры, в частности, набухающего типа, могут реагировать с изменением длины или объема на изменение pH среды, что предоставляет возможность синтеза соответствующего исполнительного устройства как для поступательного движения, так и для вращательного [13].

В случае, когда используются одновременно два или более внешних воздействий, одно может быть принято за основное, другие — за резервные



или усиливающие (бустеры). Например, в электронных набухающих электроактивных полимерах электрический сигнал может быть принят за основное воздействие, а изменение рН среды – за усиливающее (бустерное).

## 1.2 Анализ характеристик существующих электроактивных полимерных систем с точки зрения пригодности для создания на их основе исполнительных устройств

Анализ литературных источников указывает на обилие новых управляемых полимерных материалов различного типа. Помимо всего прочего это означает актуальность и востребованность научных разработок в этом направлении.

По большей части новые материалы создаются химиками без консультаций со специалистами – их потенциальными потребителями, что является в известном смысле отражением «болезни роста». Относительная новизна материалов, слабая информированность об их потенциально возможных и достигнутых физикомеханических, электрофизических и других характеристиках, и поэтому их малая востребованность специалистами других направлений, не способствует формированию потребностей в них и, как следствие, внедрению в различные сферы практической деятельности человечества. В целом исследования (в том числе и по вышесказанным причинам) недостаточно финансируются, поэтому практически ни один из новых полимерных материалов не обладает достаточно хорошо изученным спектром электрофизических, эксплуатационных и потребительских характеристик, в том числе необходимых для создания исполнительных устройств робототехники и автоматики на их основе.

Например, часто указываются статические характеристики, обычно степень деформации полимера под внешним воздействием, иногда развиваемое тяговое усилие, электрическое сопротивление, но при этом отсутствуют сведения о динамических характеристиках, о пределах



прочности, модуле упругости, степени старения, совместимости полимера с другими металлами и материалами, порогового значения величины управляемого воздействия и др.

Поэтому имеющиеся характеристики полимеров указанного класса пригодны лишь для создания первого исследовательского макета конкретного исполнительного устройства (устройство первого приближения), по результатам исследования которого будут сформированы требования к соответствующему полимеру, создан материал, определены все его характеристики, создан инженерный макет (второе приближение) и т.д. И только после создания и детального испытания опытно-промышленного образца в различных условиях эксплуатации можно сформировать полный пакет характеристик полимерного материала.

Добавим к этому, что к настоящему времени методы синтеза исполнительных устройств, использующих электро-, магнито-, свето- тепло- и рН-управляемые полимерные материалы, не разработаны, сферы их применения не выяснены.

Поэтому ожидается достаточно многоуровневый итерационный процесс создания и внедрения в практику исполнительных устройств нового типа.





## **2. Обоснование схемных решений исполнительных устройств на электроактивных полимерных материалах**

### **2.1 Обоснование требований к исполнительным устройствам, использующих электроактивные полимерные системы**

Исполнительные устройства являются составной частью систем управления и поэтому на них распространяются все требования, выдвигаемые к ним, включая эксплуатационные. С другой стороны, каждый конкретный тип конструкций, в том числе исполнительные устройства на электроактивных полимерных материалах, обладает своими специфическими свойствами, определяющие и определенные требования к ним.

Ввиду многообразия систем преобразования энергии из одного вида в другую, ограничимся наиболее употребимой и наиболее часто встречающейся в исполнительных устройствах – системы преобразования электрической энергии в механическую.

Общие требования к характеристикам ряда приводов, например, электромеханическим, зафиксированы ГОСТом (см. [14]). Естественно, ввиду новизны направления, ГОСТ не регулирует требований к исполнительным устройствам на базе электроактивных полимеров. Однако может служить основой для формирования требований к последним.

Разделим все общие требования к исполнительным устройствам на электроактивных полимерных материалах на группы.

#### **I. Общие технические характеристики:**

Назначение.

Исполнение (в зависимости от конструкции, характера движения и вида выходного органа, способа установки и т. п.);

Климатическое исполнение.

Рабочее положение устройства.

Габариты в собранном состоянии со вспомогательными устройствами.

Масса в собранном состоянии со вспомогательными устройствами.



Напряжение, ток и частота питания

II. Статические характеристики:

- 2.1 Предельная (или номинальная) величина тягового усилия (момента).
- 2.2 Предельная величина линейного или углового перемещения.
- 2.3 Потребляемая мощность.
- 2.4 Зависимость линейного или углового перемещения или скорости от интенсивности входного воздействия (тока или напряжения)

III. Динамические характеристики

- 3.1 Постоянная времени динамического процесса.
- 3.2 Максимальная величина перерегулирования.
- 3.3 Декримент затухания
- 3.4 Собственные частоты колебаний.

IV. Эксплуатационные характеристики

- 4.1 Рабочая температура эксплуатации, давление, влажность.
- 4.2 Предельная высота эксплуатации привода.
- 4.2 Уровень взрывозащиты.
- 4.3 Уровень защиты от проникновения влаги и пыли или степень защиты от попадания твердых частиц (пыли) и воды (IP).
- 4.4 Уровень защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током при эксплуатации устройства.
- 4.5 Средняя наработка на отказ.
- 4.5 Срок межремонтной службы.

V. Специальные требования

Номинальный срок эксплуатации электроактивных полимеров, ввиду их старения, окисления и т.д.

Химическая и электрохимическая совместимость электроактивных полимеров с другими конструктивными материалами и металлами (сплавами).



Стойкость к ионизирующим излучениям и радиации.

Значения механической и (или) электрической прочности при экстремальных воздействиях.

После создания, всесторонних испытаний и пробной эксплуатации перечень требований уточнится и, возможно в дальнейшем, будет зафиксирован в соответствующем ГОСТе.

## 2.2 Требования к электроактивным полимерам и оценка возможности создания электроактивных полимерных систем с заданными свойствами

Требования к электроактивным полимерам истекают из сформулированного выше списка требований к исполнительным устройствам на их использовании.

Для повышения коэффициента полезного действия исполнительного устройства в целом возникает дополнительные требования к полимерам в виде требования одно- или двухмерной анизотропии (в зависимости от типа исполнительного устройства и типа полимера).

Ввиду того, что сами электроактивные полимерные системы представляют собой достаточно сложные композиты, должны выполняться требования к чистоте исходных реагентов, их стоимости, устойчивости технологических процессов для обеспечения выпуска композитов с заданными свойствами.

Возможность создания электроактивных полимерных систем с заданными свойствами упирается в ряд вопросов.

Во-первых, как отмечено выше, в проблему создания анизотропных полимерных систем.

Обычно анизотропия полимерных систем в виде тонких нитей или тонких пленок создается за счет «выдавливания» исходного материала через экструдер и усиливается путем механической вытяжки нитей или



соответствующего растягивания пленок. По-видимому, возможен поиск новых технологий, обеспечивающих анизотропию иным путем.

Следующей проблемой является подвод к полимеру управляющего воздействия (в том числе электрического тока). Традиционные графитовые и металлические контакты не всегда пригодны для целей создания исполнительных устройств. Причин тому несколько.

Графит хрупок и имеет повышенное электрическое сопротивление. Многие металлы, окисляясь, «отравляют» полимер (например, при использовании гидрогелей), а платиновый электрод достаточно дорог. И наконец, при сжатии упругого полимера металлической пластиной на стыке возникает концентрация напряжений, появляются микротрещины, ухудшается усталостная и вибропрочность.

К тому же материал растягивается, токоподвод падает.

Следовательно, требуется создание специальных полимерных гибких «плавающих» электродов, достаточно прочных и обладающих низким сопротивлением, которые «привившись», могли бы составлять единое целое с исходным полимером, т.е. являться элементом композиционной системы.

При передаче усилий и моментов мы сталкиваемся с такими же проблемами.

Поэтому проблема создания электроактивного полимера с заданными свойствами упирается в проблему создания достаточно сложных по структуре композитов.

Теоретически такую проблему можно разрешить «в общем», однако на практике каждый конкретный вид исполнительного устройства и каждый конкретный тип полимера потребует создания своей композиционной полимерной системы.

Процессы, проходящие в электроактивных полимерах, по большей части подобны процессам класса «насыщение». Поэтому в первом приближении зависимость развиваемых ими усилий от командного сигнала (ток, напряжение) можно описать следующим уравнением:



$$\frac{dR}{dt} = \frac{ku - R}{T},$$

где  $R$  - усилие,  $u$  - командный сигнал,  $k$  - коэффициент,  $T$  - постоянная времени. Предельное усилие, развиваемое устройством, определяется произведением  $ku$ .

При более детальном исследовании исполнительных устройств на электроактивных полимерах появятся и более совершенные модели указанных устройств.

### 2.3 Определение возможных схемных решений построения исполнительных устройств, использующих электроактивные полимерные системы

Формально возможные схемные решения проистекают из требований к исполнительным устройствам и из свойств и характеристик электроактивных полимерных материалов. Разнообразие полимеров, их свойств и характеристик и недостаточная изученность не позволяют свести возможные схемные решения к четко определенному ряду «эталонных» конструкций.

Можно выделить следующие группы возможных схемных решений, основанные на:

1. основе использования эффекта Максвелла;
2. устройствах конденсаторного типа;
3. изменении других физикомеханических или электрофизических характеристик полимерного материала в виде нитей, лент, стаканов и др. под внешним воздействием (температура, поля различной природы, свет и т.д.).

Ряд схемных решений при использовании ионных электроактивных материалов внутри этих групп кратко описан выше. Поэтому остановимся на наименее изученных в этом аспекте полимерах – электронных электроактивных материалах и проанализируем возникающие при этом проблемы синтеза устройства и синтеза полимерных материалов.



Типичным представителем этого класса полимеров являются набухающие полимеры, способные впитывать жидкость до 1000% от их первоначального объема и, соответственно, изменяя при этом все свои размеры. При подаче напряжения или другого воздействия они «выдавливают» из себя жидкость, их объем уменьшается. В атмосфере жидкость из материала испаряется. Поэтому его необходимо использовать в герметичных объемах.

Сразу напрашивается следующая конструктивная схема построения исполнительного устройства в виде таблетки из набухающего полимера, помещенной на один электрод в емкость с жидкостью. Другим электродом является поршень. И емкость, и электроды должны быть химически (электрохимически) нейтральны к полимеру.

При набухании объем полимера увеличивается, поршень поднимается, при подаче напряжения объем уменьшается, поршень опускается (см. рис.3).

Коэффициент полезного действия этого устройства не может быть большим, так как на перемещение поршня затрачивается только часть энергии полимера. Но его можно увеличить, приданием полимеру резко выраженных анизотропных свойств. Это первая проблема синтеза полимера для исполнительного устройства по данной схеме.

Прочность полимера на сжатие определяет предельное усилие, развиваемое устройством. Повышение прочности на сжатие – вторая проблема синтеза.

Постоянная времени устройства определяется постоянными времени набухания и сбрасывания жидкости. Их снижение составляет третью проблему синтеза полимера. Отметим, что эта проблема тесно связана с предыдущей. Например, снижение времени набухания за счет придания материалу пористости уменьшает прочность на сжатие.



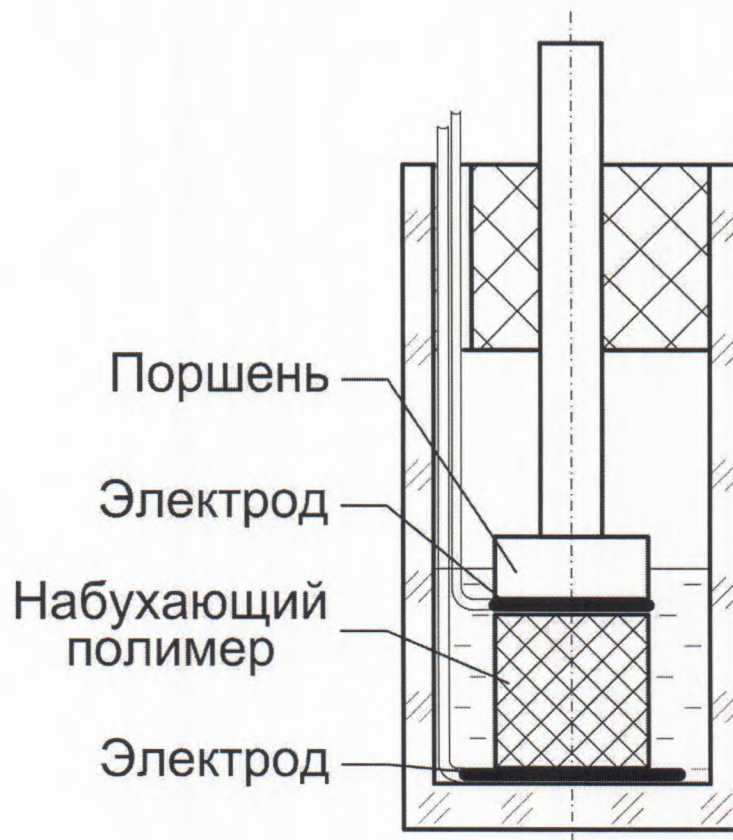


Рисунок 3. Схема исполнительного устройства на набухающих полимерах

Уменьшить постоянную времени возможно и конструктивными методами. Например, уменьшить диаметр (размер) таблетки полимера. Но так как развиваемое усилие напрямую зависит от площади поперечного сечения таблетки, то для его сохранения потребуется увеличить число поршней до разумного предела или проделать в таблетке определенное число отверстий соответствующего диаметра, несколько изменив конструкцию электродов. Однако при этом будет существовать определенный конструктивный и технологический порог, не позволяющий уменьшить постоянную времени ниже определенного предела.

Рассмотрим еще одну возможную схему построения исполнительного устройства на набухающих электроактивных полимерах.

Если материал для придания анизотропности изготовить в виде тонкой нити и растянуть, то при подаче напряжения он начнет сокращаться и выполнять полезную работу.



Минимальное значение постоянной времени определяется диаметром полимерной нити, а развиваемое усилие – их числом.

Чтобы материал не высыхал и выделенная жидкость не тратилась напрасно, нить необходимо заключить в тонкую эластичную оболочку.

Для подачи тока и передачи усилий необходимо разработать полимерные электроды, разместив их на концах нити и включив в состав единой композиционной системы.

Указанные соображения позволили сформировать схему исполнительного устройства на набухающих полимерных материалах, представленную на рис.4.



Рисунок 4. Схема исполнительного устройства на набухающих полимерах «искусственная мышца»

Прочность и упругость тонкой полимерной нити выбираются из обеспечения необходимых усилий в исполнительном устройстве,



используемом полимерную «мышцу» с учетом процессов старения материала и его устойчивости к циклическим нагрузкам.

Перечислим проблемные вопросы синтеза набухающих полимеров для подобного устройства: 1) придание полимеру ярко выраженных анизотропных свойств, 2) обеспечение необходимой прочности и упругости материала, 3) синтез полимерного электрода, включенного в общую композиционную структуру.

В приведенной выше схеме возможно использовать эффект влияния pH среды на степень набухания полимера как средство усиления (ускорения) сокращения «мышцы» (см. рис.5).

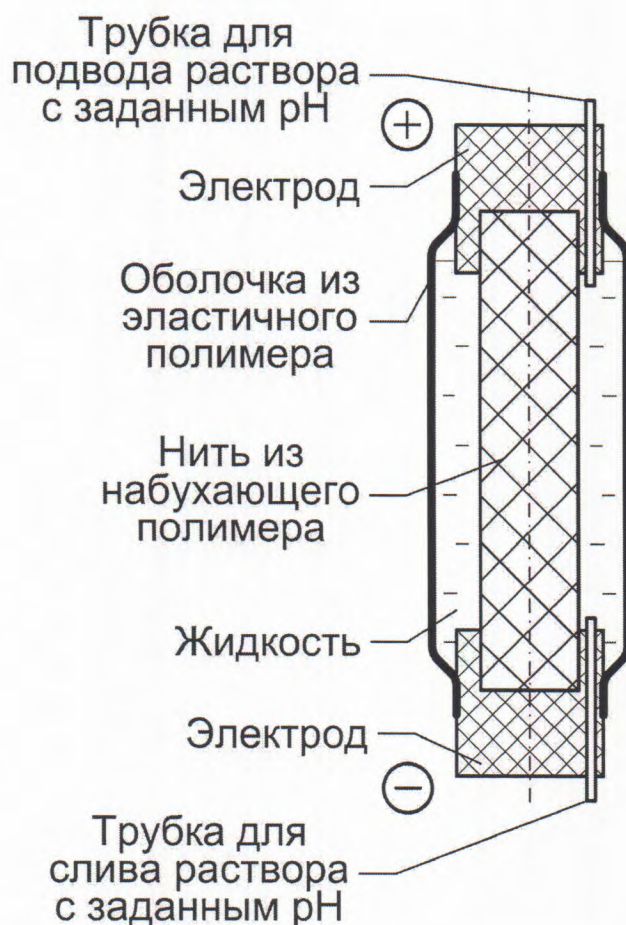


Рисунок 5. Схема исполнительного устройства на набухающих полимерах «искусственная мышца» с изменением pH среды



В этом случае под эластичную герметичную оболочку, предохраняющую полимер от высыхания, необходимо впрыскивать раствор с соответствующим значением рН, т.е. к оболочке каждой нити нужно подводить тонкую капиллярную трубочку, соединяя все в один общий коллектор. В итоге строится схема, напоминающая по своей структуре мышцу живого организма, и, в известной степени, являющуюся ее моделью.

Вращательное движение можно получить из поступательного, используя кривошипно-шатунный механизм. В некоторых случаях допустимы иные схемы устройств вращательного движения (см., например, рис.6), который работает на изменении рН-раствора.

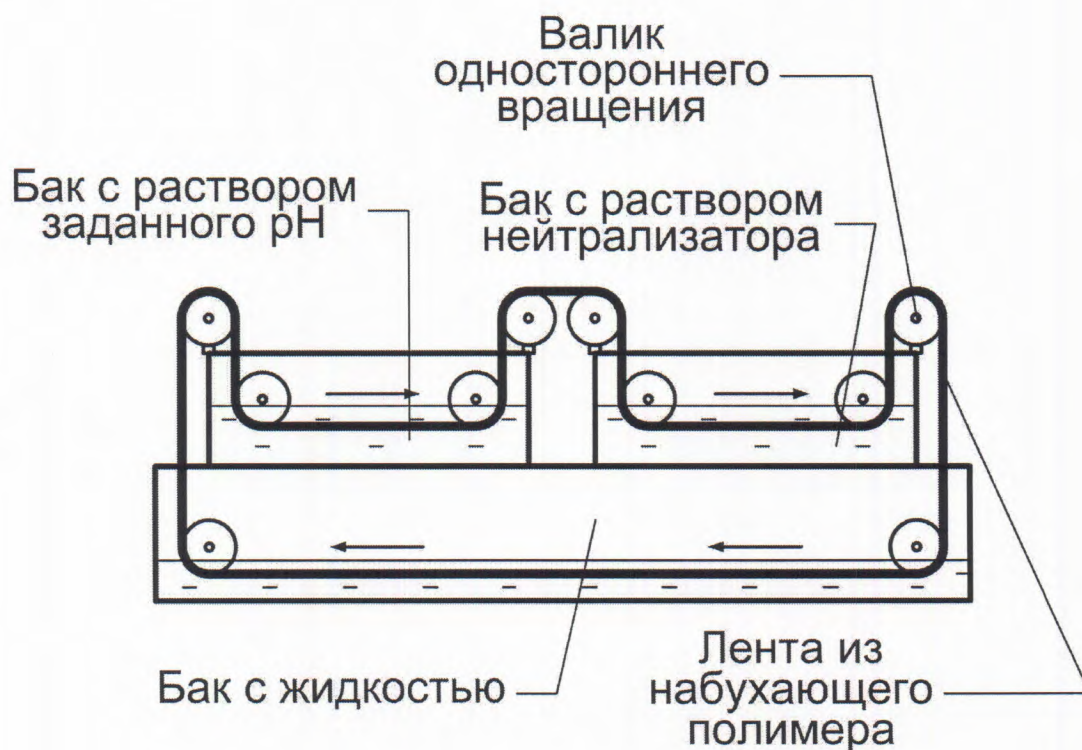


Рисунок 6. Схема исполнительного устройства на набухающих полимерах «искусственная мышца» для получения вращательного движения

В этой схеме участок ленты полимера, опущенный в бак с жидкостью, набухает и удлиняется. Другой участок ленты, погруженный в бак с



раствором заданного рН, сокращает свою длину. Согласование изменения длин участков осуществляется подбором рН раствора и длины соответствующих баков.

Так как лента растянута на валиках одностороннего вращения, то при сокращении ленты в растворе заданного рН она будет двигаться в одном направлении, последовательно проходя все баки.

Бак с раствором нейтрализатора служит для предотвращения попадания раствора заданного рН а жидкость для набухания.

Проблемы синтеза полимерных материалов и в этом случае упираются в решение проблемы синтеза полимеров с анизотропными свойствами и с заданным поперечным сечением. Возможна лента, составленная из отдельных нитей для уменьшения постоянной времени.

Резюмируем вышесказанное. Если теория синтеза полимерных материалов для работы в исполнительных устройствах типа «искусственная мышца» еще только создается, то теория синтеза исполнительных устройств на их основе находится в зачаточном состоянии. Нет полностью отработанных и детально проверенных на практике в различных условиях эксплуатации схем. Отсутствуют методики расчета, математические модели. Не определены сферы практического применения.

Вместе с тем ряд их преимуществ позволяет надеяться, что с течением времени они могут выйти из эмбрионного состояния и в дальнейшем найдут широкое применение в различных устройствах.



## Заключение

В результате выполнения НИР получены следующие научные результаты:

1. Проведен анализ научной литературы и других информационных источников, посвященных проблемам создания исполнительных устройств на электроактивных полимерных материалах.

Показано, что электроактивные полимеры могут найти применение в исполнительных устройствах нового поколения, особенно на микро- и наноуровнях.

2. На основе анализа литературы и статей ГОСТ 30533-97 обоснованы требования к исполнительным устройствам, использующие электроактивные полимерные системы.

3. Проведен анализ путей создания полимеров с заданными свойствами. Показано, что для исполнительных устройств необходимо создать специализированные многоуровневые композиты, обладающие для конкретных условий эксплуатации рядом физико-механических и электрофизических характеристик, главными из которых являются: анизотропия, надлежащий уровень прочности, минимальное омическое сопротивление токоподводящей части. Минимальное значение постоянной времени срабатывания необходимо обеспечить как целенаправленным синтезом композита, так и за счет разработки соответствующих схемных решений построения исполнительных устройств.

4. Обоснованы схемные решения построения исполнительных устройств на электронных электроактивных полимерных материалах. Разработка специальных многоуровневых композиционных полимеров может привести к новым схемным решениям, обеспечивающих более высокие технические и эксплуатационные характеристики.

Таким образом, тема научно-исследовательской работы выполнена в полном объеме.



## Список использованных источников

1. Saelinger D., Wood r. Anatomy of a robotic fly //IEEE Spectrum, march 2008. – p.22-25/
2. ГОСТ 14691-69. Устройства исполнительные для систем автоматического регулирования. Термины.
3. А.М.Тимонов, С.В.Васильева - Электронная проводимость полимерных соединений. //Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 3, С.33-39.
4. Ф.Гарнье. Проводящие полимеры. //Успехи физических наук, 1989. Т.5. С.513-527.
5. Э.Р.Блайт, Д.Блур. Электрические свойства полимеров. – М.: Физматлит, 2008. – 378 с.
6. В.Р.Беляков. Нестационарные физикохимические процессы в искусствен-ных мышцах эласто-осмотического типа. С.125-127 / Структурные особенности полимеров. – Киев, Наукова думка, 1978. – 125 с.
7. Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread // Science, 21 February 2014: Vol. 343 no. 6173 pp. 868-872 DOI: 10.1126/science.1246906.
8. С.Г.Самосват. Устройство изменения оптических характеристик светофильтров под действием электромагнитного излучения. – Патент РФ №.059274, 1996.
9. А.Г.Алексеев, А.Е.Корнев. Магнитные эластомеры. – М.: Химия, 1987 г.
10. Е.Ю.Крамаренко, А.Р.Хохлов, Г.В.Степанов, А.С.Семисалова, Н.С.Перов, П.А.Стороженко «Магнитный эластомер» Патент № 2012129715, 2014 г.
11. Эластичный магнитный материал. Патент РФ 2015583.
12. A.L.Buyanov, L.G.Revelskaya, E.Yu.Rosova, G.K.Elyashevich. Swelling behavior and pervaporation properties of new composite membrane



systems: porous polyethylene film-poly(acrylic acid)hydro gel // J. Appl. Polymer Sci. 2004, V.94, P1461-1465/

13. А.Л.Буянов, Л.Г.Ревельская, Г.А.Петропавловский, М.Ф.Лебедева, С.К.Захаров, Л.А.Нудьга, Л.Г.Кожевникова. Упругое поведение равновеснонабухающих полиэлектролитных гидрогелей на основе акриламида и акрилата натрия //Журнал прикладной химии, 1992. Т.65, №1, С.181-188.

14. ГОСТ 30533-97 Характеристики приводов. Электроприводы постоянного тока.