DOI: 10.24892/RIJIE/20250409

Линейные актуаторы на основе полимерных гидрогелей с высокой электропроводностью, активируемые переменным током*

Дайюб Т., Максимкин А.В.
ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России,
г. Москва, Российская Федерация
tarekzd@windowslive.com, aleksey_maksimkin@mail.ru

Аннотация. **Разработка быстродействующих актуаторов на основе ионных электроактивных полимеров, активируемых низким электрическим током, в настоящее время рассматривается как перспективное направление. Из-за их ограниченной электропроводности полимерные гидрогели должны активироваться высоким напряжением при использовании переменного тока выше 200 В. В этой работе были разработаны высокоэлектропроводящие гидрогели, с использованием хлорида лития (LiCL), в качестве проводящего наполнителя и поливинилового спирта (ПВС), в качестве полимерной матрицы в количестве 7 г. Было выявлено, что электрическое сопротивление гидрогелей уменьшается при добавлении LiCL, что снижает требуемое напряжение активации. Для того чтобы определить сокращение/расширение линейных актуаторов, время активации и релаксации, эффективность актуаторов и генерируемую силу в условиях активации, были подготовлены и исследованы линейные актуаторы, которые могут быть активированы циклами расширения/сокращения (набухание/усадка) в зависимости от содержания LiCl, приложенного напряжения и частоты. При нагрузке около 20 кПа было обнаружено, что общее сокращение актуаторов с содержанием LiCl 2,1 г, армированных плетеной сеткой, может достигать более 20% при времени активации ~2,2 сек, при подаче переменного напряжения 90 В и частоте 50 Гц, в то время как расширение актуаторов с содержанием LiCl 0,7 г, армированных спиральным переплетением, может достигать более 52% при времени активации ~2,5 сек, при подаче переменного напряжения 110 В и частоте 50 Гц. Кроме того, актуаторы могут работать при низком переменном напряжении 20 В при увеличении содержания LiCl до 7 г (масса ПВС и LiCl одинаковая). Более того, сила активации гидрогелей ПВС/LiCl может быть более 0,5 МПа. Разработанные актуаторы могут найти широкое применение в мягкой робототехнике, искусственных мышцах, медицине и космонавтике.**

***Ключевые слова*: поливиниловый спирт, гидрогель, актуаторы, переменное напряжение, деформация, время активации, мягкая робототехника.**

Введение

В настоящее время для мягкой робототехники и биомедицины требуются полимерные актуаторы, обладающие малым весом, простотой использования, бесшумностью, биоразлагаемостью, быстрым откликом и приемлемыми механическими свойствами [1]. Электроактивные полимеры (ЭАП) представляют собой значительный и увлекательный класс актуаторов, которые проявляют деформацию в ответ на внешнее электрическое поле. Они привлекательны для использования в качестве актуаторов, датчиков и искусственных мышц [2]. ЭАП являются оптимальным выбором для приложений электромеханических актуаторов, поскольку они обладают способностью точно контролировать преобразование электрической энергии в механическую и наоборот [3]. Хорошо известным механизмом активации ионных ЭАП под постоянным электрическим напряжением является диффузия ионов, которая вызывает изменение размера и формы актуатора (изгиб), в результате подвижности и диффузии ионов в ионных жидкостях электролита [4]. Ионные ЭАП, активированные постоянным током, имеют несколько недостатков, включая низкую прочность, медленную активацию и сложность сохранения влажности. Они также испытывают трудности с поддержанием непрерывной деформации при подаче постоянного напряжения [5]. Гидрогели, полученные на основе поливинилового спирта (ПВС), являются известным примером ионных ЭАП. ПВС является биоразлагаемым, биосовместимым и гидрофильным синтетическим полимером с превосходными адгезионными характеристиками [6].

Активация актуаторов на основе гидрогелей с использованием переменного напряжения считается новым и перспективным методом. Здесь механизм активации предлагаемых актуаторов представляет собой механизм набухания/сжатия, который происходит благодаря локальной вибрацией ионов без какого-либо движения к электродам, что приводит к нагреву материала, что в свою очередь приводит к переходу молекул воды гидрогеля в газообразное состояние и набуханию актуатора. Т. е. при комнатной температуре гидрогель имеет незначительный коэффициент набухания из-за сжатой сетчатой структуры водородными связями. При приложении переменного электрического тока гидрогель нагревается, что приводит к ослаблению водородных связей. Когда температура гидрогеля достигает 95℃, водородные связи в сетке гидрогеля разрушаются, и молекулы воды переходят в газообразное состояние, вызывая набухание актуатора. После отключения электрического тока, испарившаяся вода переходит в жидкое состояние и адсорбируется гидрогелем, что приводит к восстановлению первоначальной формы актуатора, рис. 1 [7].

В этой работе были приготовлены гидрогели ПВС и добавлен LiCl в качестве проводящего ионного наполнителя для снижения необходимого напряжения активирования.

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00558, https://rscf.ru/project/24-23-00558/. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

Для создания линейных актуаторов были использованы два типа внешних армирующих материалов (спиральное плетение и плетеная сетка). Деформация актуатора, время активации и релаксации, эффективность актуатора и генерируемая сила во время активации были изучены в зависимости от концентрации LiCl, приложенного напряжения и частоты электрического тока.

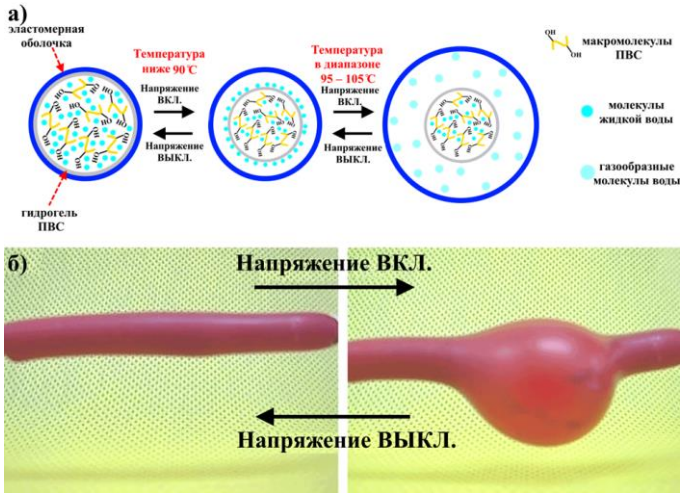

Рис. 1. Схема процесса разбухания/сжатия привода под действием переменного напряжения (*а*), фото (*б*) показывает механизм набухания/сжатия актуатора под действием переменного напряжения

Материалы и методы

Для приготовления гидрогелей был использован поливиниловый спирт (ПВС) со средней молекулярной массой 105000 г/моль и степенью гидролиза 99%. В качестве сшивающего агента был использован тетраборат натрия (буру). В качестве растворителя была использована дистиллированная вода, а в качестве токопроводящего наполнителя был использован безводный чистый хлорид лития. Для получения гидрогелей масса ПВС была 7 г (0,00067 моль/л), с содержанием буры 0,00367 моль/л на 100 мл дистиллированной воды. LiCl добавлялся в гидрогель ПВС в различных концентрациях, которые составляли 0,7, 2,1, 3,5 и 7 г. В табл. 1 показано содержание LiCl в приготовленных гидрогелях. Используя магнитную мешалку, приготовили раствор ПВС/LiCl в дистиллированной воде, нагревая раствор при температуре 140 ºС в течение 1 ч. Затем к раствору ПВС был добавлен раствор буры в дистиллированной воде при непрерывном перемешивании в течение 15 мин. После этого раствор ПВС/LiCl/буры был вакуумирован для удаления пузырьков воздуха из приготовленных гидрогелей (рис. 2).

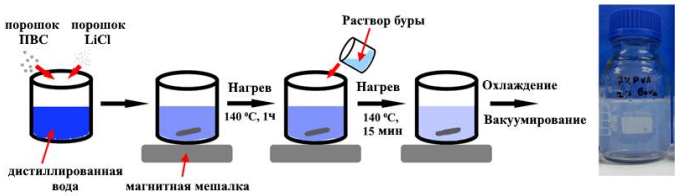

Рис. 2. Схема процесса приготовления гидрогеля ПВС

Таблица 1

Содержание LiCl в приготовленных гидрогелях

Номер материала	Код материала	Масса LiCl, г	Концентрация LiCl, моль/л
1	PS1	0,7	0,1652
2	PS3	2,1	0,4956
3	PS5	3,5	0,8261
4	PS10	7	1,6521

Подготовка гидрогелиевых актуаторов выглядит следующим образом: 4 мл гидрогеля загружают в эластичную эластомерную оболочку длиной 50 ± 5 мм и внутренним диаметром 7 ± 0,5 мм с помощью шприца, рис. 3, *а*. Оба конца оболочки закрывают и фиксируют внешним армированием и медными электродами с помощью термоусадочных трубок. На рис. 3, *б*, *в* показана схематическая конструкция гидрогелиевых актуаторов и двух типов внешнего армирования. Внутренний диаметр для обоих видов внешнего армирования составляет 7 ± 0,5 мм.

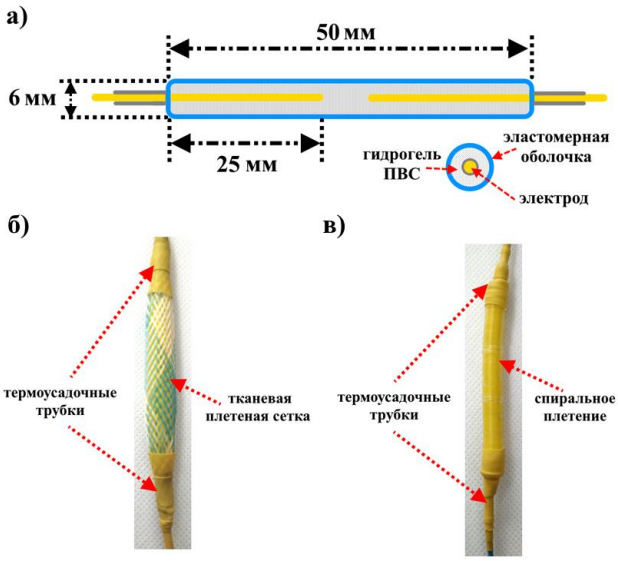

Рис. 3. Схема сборки электроактивного актуатора на основе гидрогеля поливинилового спирта (*а*), электроактивный актуатор на основе гидрогеля ПВС с армирующей тканевой плетеной сеткой из полиэтилентерефталата в сборе (*б*), с армирующей сеткой в виде спирали из нейлона 6 в сборе (*в*)

Электрическое сопротивление актуаторов на основе гидрогелей ПВС измеряли с помощью системы измерения удельного сопротивления с 4-х точечными зондами (RLC-метр АКИП-6112/2), с диапазоном измерения электрической емкости от 0,01 нФ до 10 Ф. Проводили не менее 3 измерений для каждого гидрогелиевого композита при напряжении 2 В с использованием значения частоты 50 Гц. Для изучения деформации актуаторов, времени активации и релаксации, силы активации приготовленных гидрогелиевых актуаторов ПВС с различным содержанием LiCl были применены различные значения переменного напряжения в диапазоне 20–110 В. Частота переменного электрического тока была 50 Гц и 500 Гц. Постоянная нагрузка на актуаторе 50 г. Для генерации переменного напряжения использовался источник переменного

тока (источник питания MATRIX APS-7100 AC Power Source) с рабочим диапазоном напряжения 0–310 В и диапазоном частот 45–500 Гц.

Значения деформации сжатия/расширения гидрогелиевых актуаторов измеряли с помощью высокопроизводительного лазерного датчика Wenglor YP11MGVL80 (Wenglor sensoric GmbH, Теттнанг, Германия), с линейностью 0,5%, диапазоном измерения 50 мм и разрешением 20 мкм, рис. 4, *а*. С помощью USB-интерфейса LA-2USB-14 (ООО «Руднев-Шиляев», Россия) и программного обеспечения PowerGraph (DISoft, Россия) собирались и обрабатывались данные о значениях деформации, временах активации и релаксации, силе активации. Время активации рассчитывалось, как время между моментом подачи напряжения и максимумом пика деформации, тогда как время релаксации рассчитывалось, как время между моментом выключения напряжения и начальным значением смещения. Расчет КПД актуатора производился следующим образом:

$$\eta = P_2/P_1 \text{ x } 100, \% \quad (1)$$

где η – КПД; P_1 – подаваемая электрическая мощность; P_2 – полезная электрическая мощность, вырабатываемая актуатором

$$P_1 = V \cdot I, \text{ Ватт}, \quad (2)$$

$$P_2 = m \cdot a \cdot L / t, \text{ Ватт}; \quad (3)$$

V – напряжение (В); I – ток (ампер); m – приложенная нагрузка (кг); a – ускорение (9,81 м/с^2); L – перемещение (м), t – время активации (сек).

В данном случае полезная механическая мощность, генерируемая гидрогелиевым актуатором, рассчитывалась на 1 м длины актуатора.

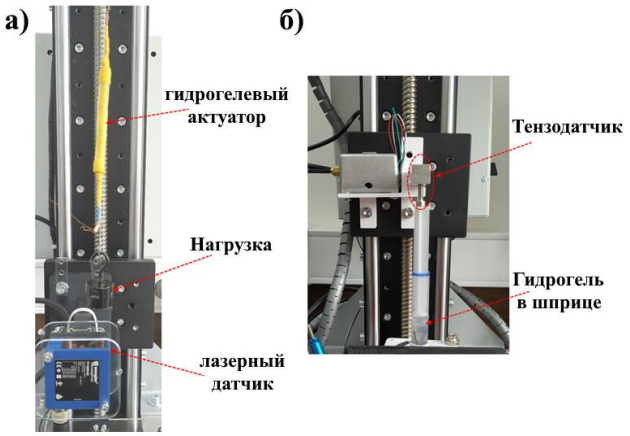

Рис. 4. Измерение деформации срабатывания лазерным датчиком(*а*), измерение силы активации тензодатчиком (*б*)

Для измерения силы, создаваемой гидрогелями при переменном напряжении (рис. 4, *б*), использовался тензодатчик SUP 1 (ShengWanJiang Transducer Technology (Shenzhen) Co., LTd, Китай) с максимальным пределом измерения 20 кг и комплексной погрешностью 0,05%. 4 мл гидрогеля PVA/LiCl помещали в шприц объемом 5 мм^3 (рис. 4, *б*).

Результаты и обсуждение

В табл. 2 показано электрическое сопротивление гидрогелей ПВС/LiCl при различных частотах. Как видно, добавление LiCl и увеличение значения частоты привело к снижению значений электрического сопротивления гидрогелей ПВС/LiCl. Это связано с тем, что ростом концентрации LiCl наблюдается увеличение активных ионов в гидрогеле, которые являются основным источником для передачи зарядов.

Таблица 2

Электрическое сопротивление гидрогелей на основе ПВС

Материал	ПВС	SP1	SP3	SP5	SP10
Электрическое сопротивление, Ом	1352±11	890±12	414±10	151±7	111±2

Водородные связи в сетке гидрогеля играют ключевую роль в процессе активации актуатора под напряжением переменного тока [8]. При повышении температуры гидрогеля в результате эффекта Джоулева нагрева водородные связи между макромолекулами полимера и гидратированными молекулами воды разрушаются, что приводит к переходу воды в газообразное состояние, что, в свою очередь, приводит к набуханию всего объема эластомерной оболочки, покрывающей гидрогель. В системах переменного тока омический ток активирует эффект Джоулева нагрева, который, в свою очередь, формирует электротермический поток переменного тока и кипение молекул воды [9]. В водных системах под действием переменного напряжения с низкими частотами и малой напряженностью электрического поля, изменение диэлектрической проницаемости водного раствора может быть незначительным, тогда как для высокопроводящих растворов (вода с солями) изменение температуры за счет эффекта Джоулева нагрева будет зависеть от проводимости и эффективного падения напряжения на электролите. Здесь температурные изменения в электролите связаны с изменениями его химического потенциала и диэлектрической проницаемости [10]. Под действием переменного электрического поля материалы с высокой диэлектрической проницаемостью могут быть более поляризованными по сравнению с материалами с низкой диэлектрической проницаемостью, что означает, что они могут хранить больше энергии. Это означает, что при добавлении LiCl в гидрогель его проводимость увеличивается, что, в свою очередь, приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости гидрогеля. Таким образом, эффект Джоулева нагрева будет достигаться при более низком переменном напряжении, что, в свою очередь, означает, что гидрогелиевые актуаторы на основе ПВС/LiCl могут быть активированы при более низком напряжении по сравнению с актуаторами на основе ПВС.

На рис. 5 и 6, показаны результаты общего расширения и сокращения гидрогелей ПВС/LiCl, а также их время активации и релаксации при применении различного переменного напряжения и частот. Для гидрогелей SP1 и SP3 минимальное переменное напряжение, необходимое для активации актуаторов, составляло 40 В, тогда как актуаторы SP5 и SP10 могут быть активированы путем применения переменного напряжения 20 В. Более того, максимальные значения деформации сокращения/расширения были

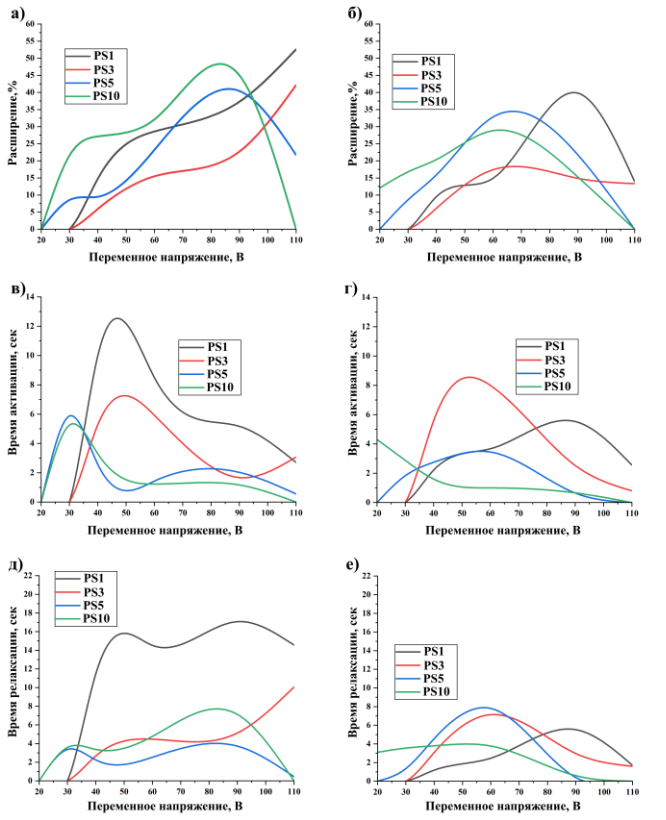

Рис. 5. Значения расширения активированных актуаторов: при 50 Гц (*а*) и 500 Гц (*б*), время активации актуаторов при 50 Гц (*в*) и 500 Гц (*г*), время релаксации актуаторов при 50 Гц (*д*) и 500 Гц (*е*)

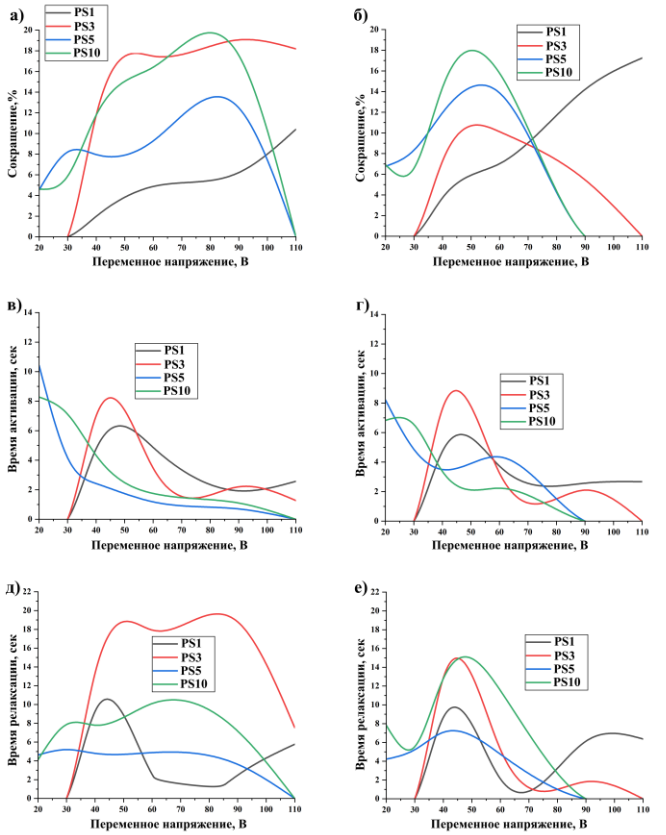

Рис. 6. Значения сокращения активированных актуаторов: при 50 Гц (*а*) и 500 Гц (*б*), время активации актуаторов при 50 Гц (*в*) и 500 Гц (*г*), время релаксации актуаторов при 50 Гц (*д*) и 500 Гц (*е*)

получены при более низком переменном напряжении, когда содержание LiCl было увеличено. Кроме того, для линейных актуаторов, армированных спиральной сеткой, значения удлинения актуаторов были выше при низкой частоте 50 Гц, тогда как для линейных актуаторов, армированных плетеной сеткой, значения сокращения актуаторов были выше при высокой частоте 500 Гц. Более того, при увеличении содержания LiCl время активации актуаторов уменьшалось, тогда как время релаксации зависело от величины деформации актуаторов и увеличивалось при увеличении деформации. Максимальное значение расширения было получено для актуатора SP1, и оно составило около 53 % при напряжении переменного тока 110 В, частоте 50 Гц; а максимальное значение сжатия было получено для актуатора SP3, и оно составило около 19 % при напряжении переменного тока 90 В, частоте 50 Гц.

Для лучшего понимания роли частоты на рис. 7 представлены значения расширения/сокращения, времени активации и времени релаксации актуаторов на основе гидрогелей PS10 при двух значениях частот. Как видно на рисунке 7, для актуатора SP10 активация происходит при переменном напряжении 20 В, а значения деформации составили 10% и 7% для расширения и сокращения, соответственно, при частоте 500 Гц. В то время, как при увеличении приложенного напряжения при частоте 50 Гц значения деформации были в целом выше по сравнению со значениями деформации, полученными при частоте 500 Гц. Кроме того, время активации было значительно уменьшено при увеличении приложенного напряжения. Как видно, при увеличении частоты до 500 Гц наибольшее значение деформации может быть получено при более низком переменном напряжении, по сравнению со значениями деформации, полученными при низкой частоте 50 Гц. Этот результат связан с эффектом Джоулева нагрева и наличием ионов Li^+ и Cl^-. В системах переменного тока эффект Джоулева нагрева тесно связан с падением напряжения на материале. Падение напряжения — это уменьшение электрического потенциала вдоль пути тока, протекающего в цикле. На более низких частотах падение напряжения на диффузном слое больше, чем на объеме, тогда как на более высоких частотах падение напряжения на диффузном слое меньше, чем на объеме, что может объяснить уменьшение генерируемого тепла в результате эффекта Джоулева нагрева в объеме гидрогеля при приложении высоких частот 500 Гц. Гидрогелиевые актуаторы на основе ПВС без добавления соли показали наилучшие результаты активации с точки зрения деформации (сокращение/расширение) и времени активации при приложении высокого переменного напряжения 200 В и высокой частоты 500 Гц. Это означает, что отсутствие ионов соли не приводит к увеличению объема конденсированного ионного слоя вблизи поверхности электрода при высокой частоте 500 Гц, что, в свою очередь, означает, что падение напряжения на диффузном слое больше, и генерируемое тепло в результате Джоулева нагрева будет больше. Как видно на рисунке 7, при частоте 500 Гц максимальная деформация была получена при напряжении переменного тока 60 В, тогда как при увеличении напряжения значения деформации уменьшались. Здесь наблюдался другой эффект, связанный с возникновением плазмы (электрифицированных газов) в гидрогеле. При высоком содержании LiCl и при высоком приложенном напряжении электрического

тока (> 90 В) актуаторы имеют периодический тип линейного движения, без проявления высокой деформации. То есть при высоком электрическом напряжении сильный нагрев происходит только вблизи поверхности электрода, что приводит к слабому набуханию актуатора в области электрода, что в свою очередь приводит к периодическому типу линейного движения. Однако этот эффект требует более глубокого дальнейшего изучения.

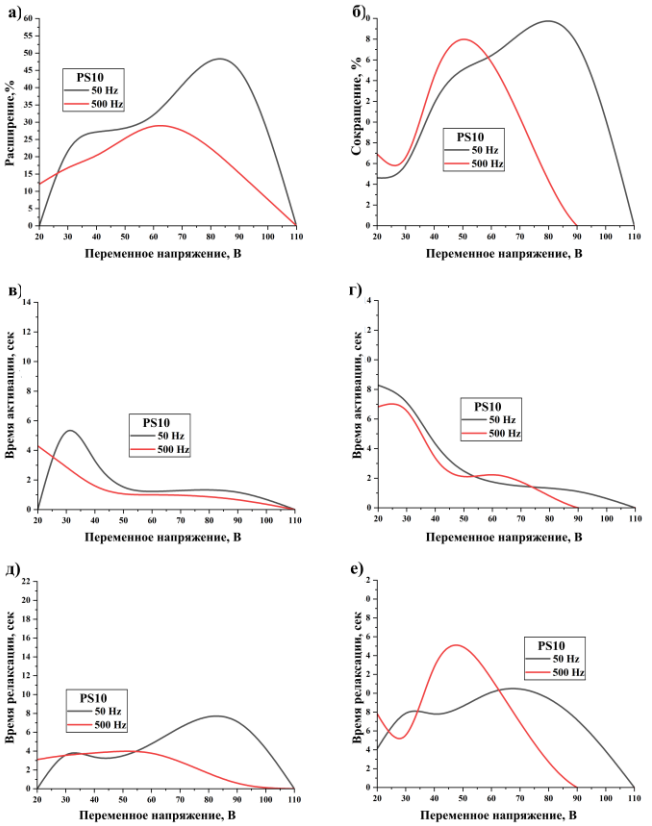

Рис. 7. Значения расширения (*а*) / сокращения (*б*), времени активации (*в*, *г*) и времени релаксации (*д*, *е*) актуаторов на основе гидрогелей PS10

Как видно из табл. 3, значения КПД гидрогелиевых актуаторов были низкими, но по сравнению со значениями для гидрогелиевых актуаторов ПВС без добавки LiCl (1,27 % при расширении и 0,43 % при сокращении), электрическая эффективность гидрогелиевых актуаторов ПВС/LiCl выше в несколько раз. Наибольшее значение КПД гидрогелиевых актуаторов, армированных спиральным переплетением, составило 4,67 % и было получено для PS10 при напряжении 90 В и частоте 50 Гц; тогда как наибольшее значение электрической эффективности гидрогелиевых актуаторов, армированных тканевой плетеной сеткой, составило 2,15 % и было получено для PS10 при напряжении 90 В и частоте 500 Гц.

Табл. 4 показывает измеренную силу активации гидрогелей ПВС/LiCl. Как видно из таблицы 4, для гидрогелей PS1, при увеличении значений переменного напряжения и частоты, сила активации возросла до 4,56 кг (570 кПа), а необходимое время для достижения максимальной силы активации было снижено до 1,36 сек, при переменном напряжении 110 В и частоте 500 Гц. Для гидрогелей SP10 было обнаружено, что увеличение частоты электрического тока приводит к снижению силы активации.

Таблица 3

Электрические свойства гидрогелей ПВС/LiCl

Гидрогель	PS1		PS10	
Напряжение, В	*90*			
Частота, Гц	*50*	*500*	*50*	*500*
Ток, А	0,042 ± 0,002	0,039 ± 0,006	0,007 ± 0,001	0,006 ± 0,001
P1, Вт	3,78	3,51	0,63	0,54
P2 (расширение), Вт	0,0056	0,0054	0,0294	0,0176
КПД (расширение), %	1,48	1,45	4,67	3,27
P2 (сокращение), Вт	0,0024	0,0042	0,0122	0,0116
КПД (сужение), %	0,06	0,12	1,94	2,15

Таблица 4

Сила активации гидрогелей ПВС/LiCl

Гидрогель	PS1		PS10	
Напряжение, В	*110*		*90*	
Частота, Гц	*50*	*500*	*50*	*500*
Сила активации, кг	3,25 ± 0,16	4,56 ± 0,22	3,14 ± 0,16	2,56 ± 0,13
Напряжение активации, кПа	406,01 ± 19,99	569,66 ± 27,45	392,27 ± 19,91	319,80 ± 16,18
Требуемое время, сек	1,88 ± 0,26	1,36 ± 0,27	1,15 ± 0,12	0,75 ± 0,03

Заключение (Выводы)

Работа посвящена разработке и исследованию быстродействующих линейных актуаторов на основе поливинилового спирта, с присутствием LiCl в качестве проводящего наполнителя. Два типа армирования (спиральное плетение и тканевая плетеная сетка) были использованы для преобразования набухающего объемного срабатывания актуаторов в линейное перемещение. Деформация актуаторов (режимы сокращения и расширения), время активации и релаксации, эффективность актуаторов и полученная сила активации были исследованы в зависимости от содержания LiCl, приложенного напряжения и частоты при нагрузке около 20 кПа. Было обнаружено, что при увеличении содержания LiCl необходимое переменное напряжение для активации актуаторов уменьшалось в результате увеличения проводимости гидрогеля. Более того, было обнаружено, что значения расширения/сокращения актуаторов из гидрогеля были лучше при низкой частоте переменного тока 50 Гц. Было установлено, что наилучшие результаты были получены в режиме расширения для актуаторов на основе гидрогеля PS1, и они могут достигать деформации более 52% при времени активации ~2,5 сек, при подаче переменного напряжения 110 В и частоты 50 Гц; в то время как в режиме сжатия наилучшие результаты были получены для актуаторов на основе гидрогеля PS3, и они могут достигать деформации более 20% при времени активации ~2,2 сек, при подаче переменного напряжения 90 В и частоты 50 Гц. Минимально необходимое переменное напряжение для активации гидрогелиевого актуатора в 20 В, наблюдается при одинаковых массовых ПВС и LiCl. Кроме того, усилие активации полученных актуаторов может быть более 0,5 МПа при переменном напряжении 110 В. Полученные актуаторы на основе гидрогеля ПВС/LiCl потенциально имеют широкий спектр применений в мягкой робототехнике, искусственных мышцах, медицине и аэрокосмической отрасли (рис. 8).

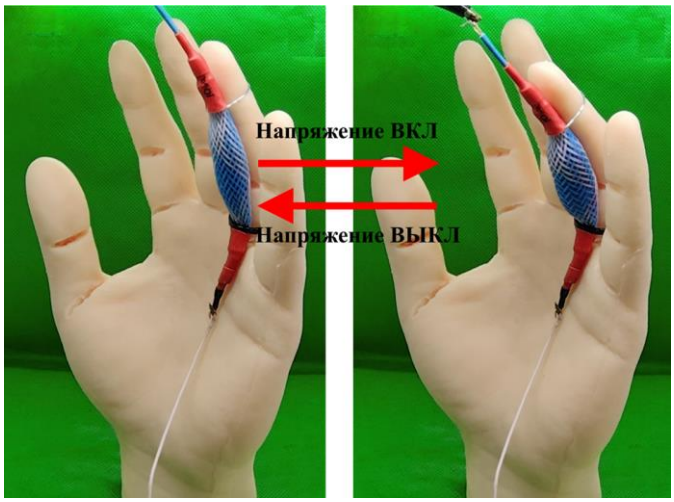

Рис. 8. Линейный актуатор на основе гидрогелей, армированный тканевой плетеной сеткой, в качестве искусственной мышцы

ЛИТЕРАТУРА

1. Ozsecen M.Y. Nonlinear force control of dielectric electroactive polymer actuators / M.Y. Ozsecen, C. Mavroidis // Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD). – 2010. – vol. 7642. – 76422C. DOI: 10.1117/12.847240.

2. Behl M. Shape-memory polymers / M. Behl, A. Lendlein // Materials Today. – 2007. – 10(4). – P. 20-28. DOI: 10.1016/S1369-7021(07)70047-0.

3. Cardoso V.F. Metamorphic biomaterials / V.F. Cardoso, C. Ribeiro, S. Lanceros-Mendez // Bioinspired Materials for Medical Applications. – 2017. – P. 69-99. DOI: 10.1016/B978-0-08-100741-9.00003-6.

4. Liu Y. Ion distribution in ionic electroactive polymer actuators / Y. Liu, C. Lu, S. Twigg, J.-H. Lin, G. Hatipoglu, S. Liu, Q.M. Zhang // Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD). – 2011. – 79762O. DOI: 10.1117/12.880528.

5. Biddiss E. Electroactive polymeric sensors in hand prostheses: Bending response of an ionic polymer metal composite / E. Biddiss, T. Chau // Medical Engineering & Physics. – 2006. – 28(6). – P. 568-578. DOI: 10.1016/j.medengphy.2005.09.009.

6. Adelnia H. Freeze/thawed polyvinyl alcohol hydrogels: Present, past and future / H. Adelnia, R. Ensandoost, S.M. Shehzahdi, G. Jaber Nasrollah, V. Emad Izadi, T. Hang Thu // European Polymer Journal. – 2022. – 164. – 110974. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110974.

7. Dayyoub, T. Linear Actuators Based on Polyvinyl Alcohol/Lithium Chloride Hydrogels Activated by Low AC Voltage / T. Dayyoub, M. Zadorozhnyy, K.V. Filippova, L.D. Iudina, D.V. Telyshev, P.V. Zhemchugov, D.G. Ladokhin, A. Maksimkin // J. Compos. Sci. – 2024. – 8. – 323. DOI: 10.3390/jcs8080323.

8. De Ninno A. Dielectric permittivity of aqueous solutions of electrolytes probed by THz time-domain and FTIR spectroscopy / A. De Ninno, E. Nikollari, M. Missori, F. Frezza // Physics Letters A. – 2020. – 384(34). – 126865. DOI: 10.1016/j.physleta.2020.126865.

9. Lian M. Microfluidic flow reversal at low frequency by AC electrothermal effect / M. Lian, J. Wu // Microfluid. Nanofluid. – 2009. – 7. – P. 757-765. DOI: 10.1007/s10404-009-0433-6;

10. Anand G. Effects of Frequency and Joule Heating on Height Rise between Parallel Electrodes with AC Electric Fields / G. Anand, S. Safaripour, C. Snoeyink // Langmuir. – 2022. – 38 (3). – P. 1204-1214. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c02967.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250409

Linear Actuators Based on High Conductivity Polymer Hydrogels Activated by Alternating Current

Dayyoub T., Maksimkin A.
Institute for Bionic Technologies and Engineering
I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)
Moscow, Russian Federation
tarekzd@windowslive.com, aleksey_maksimkin@mail.ru

Abstract. **It is presently regarded as a important task to create swiftly functioning actuators utilizing ionic electroactive polymers stimulated by low electric current. Polymer hydrogels must be activated with high voltage using alternating current exceeding 200 V due to their low electrical conductivity. In this work, highly conductive hydrogels were developed using lithium chloride (LiCl) as a conductive filler and polyvinyl alcohol (PVA) as a polymer matrix in an amount of 7 g. It was found that the electrical resistance of the hydrogels decreases with the addition of LiCl, which reduces the required activation voltage. In order to determine the contraction/expansion of the linear actuators, activation and relaxation times, actuator efficiency, and the generated force under activation conditions, linear actuators that can be activated by expansion/contraction (swelling/shrinkage) cycles depending on the LiCl content, applied voltage, and frequency were prepared and investigated. At a load of about 20 kPa, it was found that the total contraction of the actuators with a LiCl content of 2.1 g reinforced with a braided mesh could reach more than 20% at an activation time of ~2.2 sec when applying an AC voltage of 90 V and a frequency of 50 Hz, while the expansion of the actuators with a LiCl content of 0.7 g reinforced with a spiral weave could reach more than 52% at an activation time of ~2.5 sec when applying an AC voltage of 110 V and a frequency of 50 Hz. In addition, the actuators could operate at a low AC voltage of 20 V by increasing the LiCl content to 7 g (the mass of PVA and LiCl is the same). In addition, the PVA/LiCl hydrogels could possess an activation force exceeding 0.5 MPa. The actuators developed could have broad applications in medicine, astronautics, soft robotics, and artificial muscles.**

Keywords: **polyvinyl alcohol, hydrogel, actuators, alternating voltage, deformation, activation time, soft robotics.**