

ЭЛАСТИЧНАЯ МЕХАНИКА

Основа машин и механизмов будущего

В. Шихирин

Редакция продолжает публикацию статей, посвященных, на первый взгляд, самым фантастичным, но, возможно, вполне реальным разработкам, открывающим новые перспективы развития общества. Именно такой разработкой может стать эластичная механика (Elastic engineering – Elastoneering®) – новейшее направление в технике, созданное на стыке таких наук, как математика, механика, электроника, биология, бионика и химия. Эта экологически чистая технология позволит реализовать механические действия, движения и перемещения с более высокой эффективностью, чем традиционная механика. Изделия эластичной механики найдут применение в самых разных областях человеческой деятельности: от манипуляторов до роботов, от бесшумных мощных лифтов и грузоподъемных механизмов до сверхпроходимой и легкой техники, от спасательной техники до боевых машин, от индивидуальных до гигантских преобразователей природной энергии.

Электронный инфаркт механической собаки. Рассмотрим "робот-собаку", сконструированный и изготовленный методами традиционной механики и электроники. Его опорно-двигательный аппарат выполнен из многосвязных механизмов, увешанных датчиками и исполнительными механизмами, энергетическими и

⁷И подлинно: спроси у скота, и научит тебя, у птицы небесной, и возвестит тебе;

⁸Или побеседуй с землею, и наставит тебя, и скажут тебе рыбы морские.

¹² Иов

информационными кабелями, системой управления, различными преобразователями энергии для питания мозга, пищеварительного тракта и т.п. При этом система управления, источники питания, преобразователи энергии и органы собаки располагаются вне тела, иначе она не сдвинется с места или получит инфаркт после первых же шагов. Таким образом, наша "собака" состоит из двух независимых, физически не связанных в единую структуру, частей: механической и электронной. Согласование их действий требует неоправданно больших материальных и энергетических затрат. Результат этого – оскудение природных ресурсов, в первую очередь углеводородного топлива. А атомные источники энергии ничем не отличаются от ядерного оружия гигантской разрушительной силы, способного начать самопроизвольно функционировать в любой момент времени. Следствие этого – энергетические кризисы, неотвратимо ведущие к глобальному кризису. Отсюда ясна необходимость поиска решений, которые позволят:

- преобразовывать в необходимых количествах "неисчерпаемую" и "даровую" энергию солнца, ветра, волн, течений и перепадов давления в воздушном и океаническом пространстве,
- сократить на 10–70% потребление углеводородного топлива. Возможно, эти решения можно найти в природе.

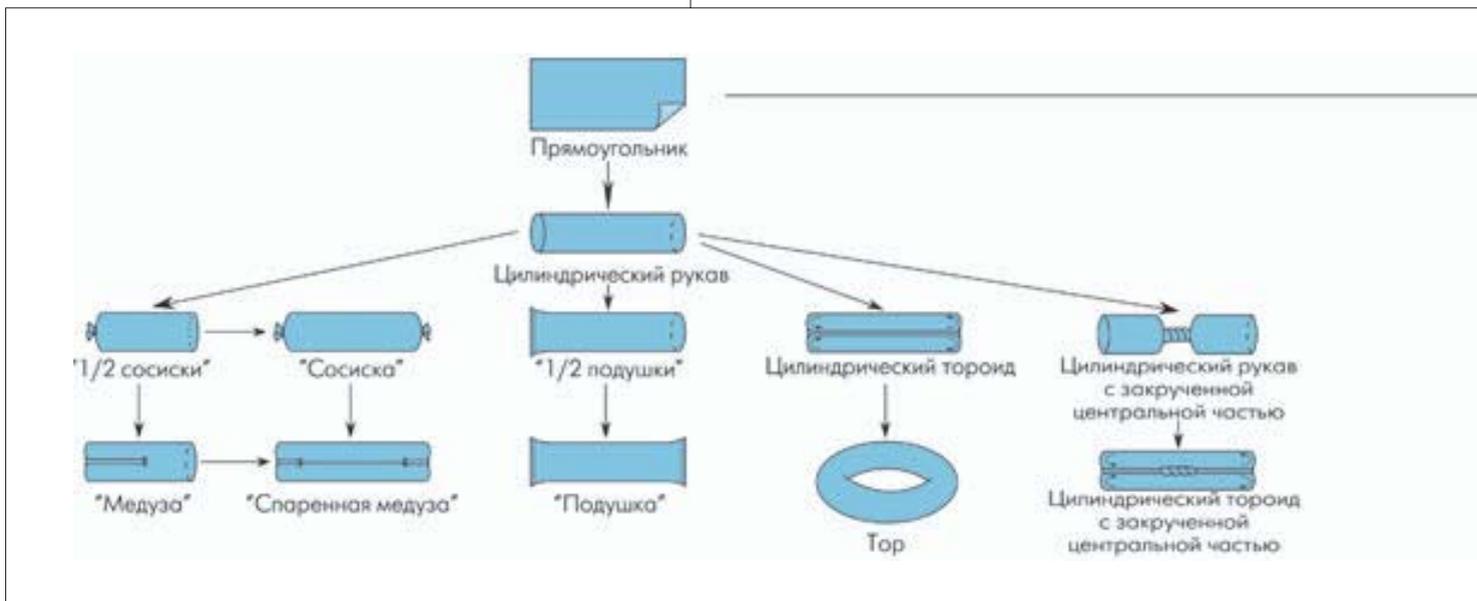


Рис. 1. Схема раскроя пространственных поверхностей эластичных оболочек из плоских заготовок

Обратимся к природе. Одна из самых распространенных в ней конструкций – оболочка. Пленка-оболочка окружает одноклеточные и многоклеточные организмы. Мускулы – это пучок волокон, заключенный в пленку, на которую воздействует давление крови. В невидимых защитных оболочках находятся Земля, Солнечная система, Галактика. Вихревые потоки газов и жидкостей, например атмосферные циклоны диаметром до нескольких тысяч километров, также заключены в невидимые оболочки – силовые поля с равнонапряженными поверхностями. Важно и то, что в структуре материала этих оболочек находятся информационные и энергетические связи, датчики и исполнительные механизмы, невидимые центры обработки информации (т.е. “электронная система управления”), которые не только поддерживают жизнь этих явлений (статика), но и обеспечивают их оптимальное перемещение в окружающем пространстве (динамика) с минимальными затратами энергии.

По-видимому, одним из решений поставленной выше задачи может стать **эластичная механика – Elastic engineering (Elastoneering®)** [1-3], в основу которой положены природные механизмы, например принципы действия перистальтики, координирующей с высоким КПД работу мышц пищеварительного тракта живого организма, или такие глобальные природные явления, как течения, волны, ветер, перепад давлений в атмосфере и океане. По аналогии с природой, основной конструктивный элемент эластичных машин или механизмов – заполненная текучей (рабочей) средой эластичная оболочка, которая под воздействием внешних и/или внутренних сил постоянно и непрерывно ищет свое равнонапряженное состояние. В ходе этого поиска происходит преобразование энергии текучей (рабочей) среды, заключенной в оболочку, в движение. Электронные средства управления расположены в структуре материала оболочки (эластичная электроника). В результате механическая и электронная части системы сформированы в виде единой физической структуры, которая выполняет взаимно согласованные функции, и механизм преобразования энергии в движение, превращения одного вида движения в другие – однозвенный, а не многозвенный, как в традиционной механике.

Сегодня существуют самые разнообразные решения проблемы объединения электронной и механической систем в одной машине для экономии технологического и бытового пространства, улучшения потребительских свойств и т.п. Это – мягкие электронагрева-

Представляем автора статьи

ШИХИРИН Валерий Николаевич. Кандидат технических наук.

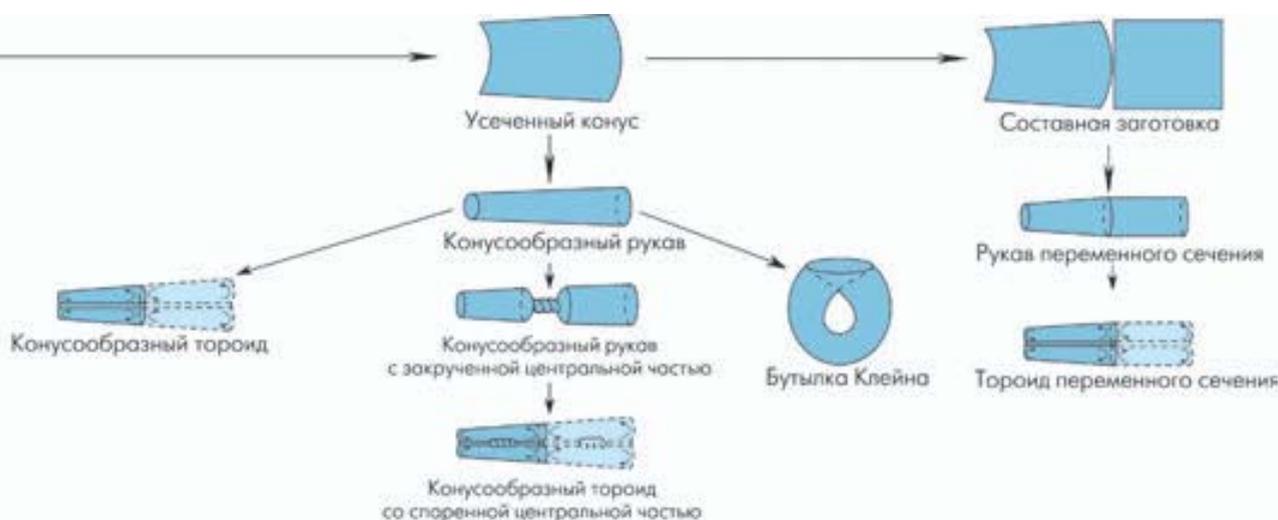
Действительный член Российской Академии естественных наук им. Вернадского. Окончил приборостроительный факультет Ижевского механического института в 1971 году. Разработчик принципов эластичной механики. С целью изучения и внедрения в практику инноваций на основе эластичной механики в 1992 году организовал российскую научно-производственную фирму “Градерика, лтд.”, а в 2000 году – фирму TortechT Solutions Inc. в США, президентом которой является. Автор более 180 публикаций, одной книги.



тели, ленточные энергетические и информационные кабели, изделия из токопроводящей резины, эластичные теплопроводящие изоляторы, слоистый полимерный материал для хранения голографической информации, антенные КВЧ- и СВЧ-излучатели, экраны из гибридных, органических и неорганических материалов, “тряпичные” солнечные батареи, т.е. рубашка, сшитая из синтетического волокна, которое под воздействием света генерирует электрический ток и т.п. Но эти инновации ничего общего с эластичной механикой не имеют.

Простейшие элементы эластичной механики на базе оболочечных конструкций, позволяющие использовать свойства текучей среды, материалов мягкой и эластичной оболочки и элементов классической механики, существуют давно. Это – пневмопалубка (мягкая опалубка), воздухоопорные сооружения на основе мягких и эластичных оболочек, мягкие несущие оболочки гидротехнических сооружений (плотины, водоотделители и т.п.), податливые оболочки, допускающие большие изменения формы (элементы корпуса судна, контейнеры, домкраты, надувные лодки и т.п.), воздухоплавательный транспорт (мягкие аэростаты и дирижабли).

Волшебные пузырьки. Эластичная оболочка работоспособна только при возникновении избыточного давления текучей среды. Это избыточное давление определяет энергетические свойства системы *оболочка-рабочая среда*, ее геометрическую форму и изме-



нение формы под нагрузкой. Собственно оболочка не имеет строгой формы, ее материал в пределе абсолютно тонок, прочен, эластичен, невесом. При этом оболочки любой формы имеют некоторые общие качественные, так называемые топологические свойства (размерность, число кривых, ограничивающих ее поверхность и т.п.). Под действием внешних и внутренних сил оболочка может принимать множество различных форм, причем топологическая связность ее поверхности (h) остается неизменной, все формы гомеоморфны, а метрические характеристики изменяются за счет образования зон складок в ненапряженных зонах. При заполнении рабочей средой геометрические размеры оболочки могут изменяться в пределах от долей миллиметра до десятков и сотен метров.



Рис.2. Конусообразный тороид

В основу классификации реальных эластичных оболочек (рис.1) положен комбинированный "тополого-геометрический" принцип, сочетающий топологический язык описания общих свойств поверхностей оболочки с геометрическим ее описанием, определяющим допустимые физические преобразования конструкции. Итогом такой классификации с учетом используемого материала, системы управления, области применения, выполняемой роли в компоновочной схеме и т.п. стала n -мерная таблица, своеобразная "Периодическая система эластичных машин и механизмов" – Система Шихирина (Shikhirine's system)*.

Вследствие рассмотренных выше свойств эластичных оболочек математическое описание процесса формообразования и трансформирования нагруженной системы оболочка-рабочая среда затруднено и требует громоздкого традиционного дифференциального математического аппарата. Поэтому работу такой системы следует моделировать. Для получения физической (пузырьковой), а затем и математической модели (овалы Кассини, поверхности вращения которых имитируют различные деформированные формы оболочек) необходимо уточнить начальные условия существования эластичной оболочки под нагрузкой. Во-первых, следует иметь в виду, что рабочая среда оболочки – разрывна, тогда как сама оболочка – едина! Во-вторых, в оболочку заключен реальный рабочий газ, межмолекулярное взаимодействие частиц которого играет важную роль! В-третьих, силовые поля, формирующие механическую напряженность оболочки, возникают под действием межмолекулярных сил и сил давления сжатого газа. В-четвертых, равнонапряженным является сферическое поле, а также поле эквипотенци-

альной поверхности. И наконец, в основу принципа формирования поля механического напряжения эластичной оболочки следует положить законы возникновения электрического силового поля – аналога механического силового поля, возникающего в результате давления среды, заключенной в замкнутое пространство.

Наиболее интересны с точки зрения практической реализации так называемые **кинематически подвижные эластичные тороидальные оболочки**, заполненные текучей (рабочей) средой и кинематически связанные с конструктивными элементами в виде центрального, внешнего и/или внутреннего периферийного тела. Технология машин и механизмов, выполненных на основе тороидальных оболочек, получила название торовой технологии – TORTECH[†] [4,5].

Под действием избыточного давления рабочей среды такие оболочки принимают различные формы тороидов, поверхность которых образована вращением вокруг оси/осей симметрии плоских кривых 2-го или 4-го порядка (рис. 2). Оболочка при этом имеет не менее пяти степеней свободы перемещения: вдоль трех осей координат и вокруг двух осей вращения. К функциональным особенностям тороидальных эластичных элементов можно отнести следующие:

- перемещение под действием внешних или/и внутренних сил путем выворачивания или наволакивания по жесткой или эластичной опорной поверхности, с "омыванием" ее деформированных участков и инородных включений. При этом тороид самоуплотняется в замкнутой, охватывающей его периферию, поверхности ("сам себя находит");
- широко регулируемую площадь контакта при небольших значе-



Рис.3. Слои стенки пищеварительного тракта – идеального конструкционного материала

- ниях удельного давления на опорную поверхность ($0,1 \text{ кг/см}^2$) и давления рабочей среды оболочки ($0,1-0,3 \text{ кг/см}^2$);
- формирование тяговых усилий и ударного эффекта;

*Более подробно Система Шихирина и принципы формирования эластичной механики, в том числе и эластичной электроники, будут рассмотрены в следующих номерах журнала.

- преобразование одних видов движения в другие, например поступательного движения во вращательное;
- захват предмета независимо от его формы при наволакивании, удержание и/или перемещение его внутри тора с регулируемым обжимающим усилием ("мягкий" захват);
- выталкивание с различной начальной скоростью находящегося внутри тороида предмета при выворачивании;
- переход из одного устойчивого состояния в другое при выворачивании и/или наволакивании;
- возникновение в точке "перелома" шарнирного качения, по меньшей мере, одного свободного конца;
- вдвое большую скорость движения центральной части тела относительно периферии тора при выворачивании, а при наволакивании – вдвое большую скорость тора относительно центральной части;
- перемещение в поперечном направлении качением.

Важнейший элемент эластичной механики – **эластичный интеллектуальный материал**. Основные требования к нему – герметичность, прочность, эластичность при минимальной толщине и массе. Прочность материала зависит от свойств армирующих материалов, а стойкость к воздействующим факторам обеспечена покрытием, например полимерным. Кроме этого, эластичный интеллектуальный материал оболочки является конструкционным. Он должен иметь единую физическую структуру, содержащую механическую и электронную системы и при этом сохранять свои физико-механические свойства при разнообразных воздействиях, например растяжении.

Сегодня в радиоэлектронной промышленности широко применяются различные конструктивно-технологические варианты печатных плат, отличающиеся топологией рисунка, методом сборки и монтажа радиоэлектронных компонентов, а также используемыми конст-

Сравнение пищеварительного тракта и идеального композиционного материала оболочки эластичной машины или механизма

Название	Биологический элемент		Технический элемент	
	Состав	Функция	Функция	Состав
Слизистая оболочка	Железистый эпителий с протоками для прохождения слизи и пищеварительных ферментов. Соединительная ткань с кровеносными и лимфатическими сосудами	Секретирование слизи и обволакивание ею пищи для облегчения прохождения пищевого комка и предотвращения переваривания стенок пищеварительного тракта собственными ферментами. Выделение пищеварительных ферментов для расщепления содержимого пищевого комка. Крепление в соединительной ткани кровеносных и лимфатических сосудов	Нанесение защитного покрытия на внутреннюю поверхность эластичной оболочки и антифрикционного покрытия на внутреннюю поверхность эластичной оболочки и находящегося внутри нее предмета – формирование эластичного контейнера. Химическое воздействие на предмет, всасывание и перемещение жидких продуктов химической реакции по энергетическим каналам	Первый внутренний слой материала оболочки содержит армирующий слой с защитным и антифрикционным покрытиями. В межнитиевом пространстве слоя закреплены энергетические каналы и каналы связи, напорные и вакуумные насосы для перемещения, всасывания и перекачки жидкости
Подслизистая основа	Соединительная ткань из коллагеновых и эластичных волокон, содержащая кровеносные и лимфатические сосуды, нервные сплетения и слизистые железы	Основа пищеварительного тракта. Крепление в ее стенках кровеносных и лимфатических сосудов, а также нервных сплетений. Выделение слизи в протоки слизистой оболочки	Дальнейшее перемещение продуктов химической реакции по энергетическим каналам. Выработка антифрикционного покрытия	Второй основной слой материала оболочки, в межнитиевом пространстве которого закреплены система управления, информационные и энергетические каналы. Все вместе образует первую автономную электронную систему
Мышечная основа				Интеллектуальный слой
Подслизистое-нейроное сплетение	Нервное сплетение	Регулировка секреции желез, находящихся в стенке пищеварительного тракта	Управление формированием в реакторе продукта необходимого физико-химического состава	Автоматическая система управления технологическим процессом. Вторая автономная электронная система
Циркулярный (кольцевой) мышечный слой	Внутренний слой мускулатуры пищеварительного тракта. Состоит из кольцеобразных мышц, имеет четыре коротких участка с утолщенными кольцеобразными мышцами – сфинктера	За счет координированного сокращения кольцеобразных мышц (волнообразные перистальтические движения) измельчает, перемешивает и проталкивает пищевой комок по пищеводу	Автоматическое измельчение, перемешивание содержимого эластичного пакета, проталкивание его по эластичному трубопроводу	Автоматическая трубопроводная транспортная система, состоящая из пяти реакторов-накопителей, соединенных шлюзами
Продольный мышечный слой	Внешний слой мускулатуры пищеварительного тракта. Состоит из продольных мышц	Расслабления и сокращения сфинктеров контролируют перемещение пищевого комка из одного отдела пищевода в другой (блокада эвакуации и разделение)	Автоматическое накопление определенного числа эластичных контейнеров и перемещение этой порции из одного реактора через затвор (разделитель сред) в другой	Автоматическая трубопроводная транспортная система, состоящая из пяти реакторов-накопителей, соединенных шлюзами
Межмышечное (ауэрбахово) пространство	Нервное сплетение, расположенное между кольцевым и продольным мышечными слоями	Скопление нервных клеток вегетативной нервной системы, контролирующей перистальтику	Управление процессами перемешивания, измельчения содержимого эластичного контейнера и его проталкивание по эластичному трубопроводу	Третья автономная электронная система
Серозная оболочка	Рыхлая, волокнистая соединительная ткань, содержащая нервы, кровеносные и лимфатические сосуды, идущие к пищеварительному тракту и от него. Внешняя поверхность увлажнена для уменьшения трения различных отделов пищевода друг о друга и о другие органы	Основа для поддержания и крепления пищеварительного тракта к задней стенке тела, а также нервов, кровеносных и лимфатических сосудов, идущих к пищеводу и от него	Система растяжек для подвешивания предмета к поясу закрепления и одновременно эластичный каркас для крепления системы управления, входящих и выходящих информационных и энергетических каналов	Располагается во внешнем слое оболочки. Подвесная независимая система. Четвертая дистанционная электронная система
Пищевой комок	Пища	Снабжение организма энергией и строительным материалом	Предоставление органического топлива и компонентов строительного материала	Помещенный в эластичный контейнер источник энергии и строительного материала

руктивно-технологическими вариантами радиоэлектронных элементов. Эти сборки можно рассматривать как идеализированный конструкционный материал эластичного механизма, в который входят интеллектуальный слой (радиокомпоненты, в том числе микросхемы), проводящий слой (энергетические и информационные каналы связи на подложке или печатной плате), резистивный и диэлектрический слои микросхем и микросборок, межслойные соединения, силовой слой (подложка микросхемы или печатной платы), защитный слой (например, резиновая заливка "интеллектуального" слоя).

В химической промышленности выпускаются разнообразные композиционные пленочные, ткане-пленочные и другие гибкие, мягкие и эластичные конструкционные материалы, пригодные для создания физически единого слоя как некоего идеализированного блока или модуля радиоэлектронной аппаратуры. В структуру такого идеализированного материала входят силовой слой (ткань, сеть, нетканый материал, кордовый шнур, мононити, а также модифицированные пленки), герметизирующий защитный слой (слой покрытия) и адгезионный слой для улучшения связи покрытия с армирующим материалом.

В зависимости от требований эксплуатации он может быть одно- или многослойным. Наиболее привлекательны армирующие тканые композиционные материалы, поставляемые предприятиями легкой промышленности. Они могут быть плоскими, объемными, сложными (трубчатые, ячеистые, пространственные и т.п.). В любом случае ткань – основа для размещения на/в ней электронных приборов и устройств, энергетических и информационных каналов связи. Устройства управления (чипы) могут располагаться в защитном герметизирующем слое или в межслойном полимерном слое. Размеры, масса, электромагнитные и другие характеристики встраиваемых электронных компонентов не должны нарушать работоспособности оболочки в составе эластичной машины или механизма.

Анализ и сопоставление конструкционных материалов, используемых в радиоэлектронике и химии, и идеального биологического конструкционного материала показал (на примере пищеварительного тракта человека) возможность определения свойств идеализированного конструкционного материала оболочки и самого идеализированного эластичного механизма (рис.3, табл.). Таким образом, существующие простейшие элементы эластичной механики – оболочечные конструкции – позволяют использовать свойства текучей (рабочей) среды и материалов, а также элементы классической механики (рычаги, тяги и т.п.) для плавного управления и преобразования энергии рабочей среды и упругости оболочки в механическую работу. Более того, сегодняшний уровень химической, электронной, легкой отраслей промышленности позволяет создать такие материалы.

Итак, к достоинствам эластичных машин и механизмов следует отнести следующие:

- возможность получения плавного (бесступенчатого) движения при взлете, плавании, перемещении в непрямолинейном направлении, а также бесступенчатых пульсаций, волнового движения, колебаний вдоль и поперек осей вращения, сворачивания в компактный объем, телескопической укладки и т.п.;
- возможность создания абсолютно новых "механоэлектронных" систем, например мягких или эластичных радиоэлементов;
- более высокий в сравнении с традиционной механикой коэффициент полезного действия, поскольку трение скольжения заменено трением качения (эффект "колеса");
- низкая энерго- и материалоемкость, поскольку "жесткие" конструкционные материалы заменены эластичными конструкционными материалами оболочек;
- высокая мобильность и простота эксплуатации, ремонта, монтажа и демонтажа, особенно в экстремальных условиях;

- универсальность конструктивных элементов;
- плавность регулировки;
- минимальная масса и габариты при хранении (несмотря на большие "рабочие объемы");
- экологическая чистота;
- бесшумность работы;
- отсутствие необходимости создавать новые специальные производства для изготовления систем эластичной механики.

Машины и механизмы на основе эластичной механики смогут найти самое широкое применение в любой сфере деятельности человека. На сегодняшний день уже изготовлены многочисленные действующие модели [5,6] транспортных средств высокой проходимости для транспортировки большегрузных и крупногабаритных объектов [7], антенно-фидерных устройств, элементов роботов и кластерных систем [8], устройств дозаправки топливом, контейнеров, погрузочно-разгрузочных, амортизирующих и демпфирующих систем, игрушек и т.д. Испытания опытных образцов движителей на базе конусного тороида показали, что при подаче в оболочку длиной 2 м газа под давлением в 0,07 ат тяговое усилие превышает 0,5 т.

Разработка новой эластичной механики оказалась возможной только благодаря синтезу достижений многих областей науки. Все науки, вышедшие из философии и развивавшиеся самостоятельно, теперь могут быть вновь объединены для создания эластичных машин и механизмов будущего. И тогда эластичная механика станет философией нового тысячелетия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шихирин В.Н. Эластичные машины и механизмы будущего. – Сумма технологий, 2000, № 4, с.52–53.
2. Шихирин В.Н. Цивилизации брошен вызов. Ответом, возможно, станет эластичная механика. – Сорок один (окружная газета Зеленограда), 10 февраля 2001, с.3.
3. Shikhirine V.N. Elastic machines and mechanisms of the future. – The Summary of Technologies, № 1, 2001, p.23–28.
4. Рукавные и торовые преобразователи. Возможность и целесообразность их применения в машинах и устройствах широкого назначения/ Под общ. ред. А.И.Коробова и В.Н.Шихирина – Спец. сборник ВИМИ. – М.,1995.
5. Презентационный ролик фирмы Tortech^T Solutions Inc. – ELASTIC MASHINES AND MECHANISMS,2001.
6. www.elastoneering.com
7. Международная заявка PCT/RU 96/00258. Торовый движитель транспортного средства/ В.Н. Шихирин WO 98/10975.
8. Shikhirine V.N. Kinematics and Electronics of Elastic Systems. –In: SEMI EXPO CIS 2000, Oct.3-6, Program Directory and Product Guide. – Moscow, p.37–39.



Новое микроэлектромеханическое устройство

В Сандийской национальной лаборатории разработаны дешевые кремниевые микрозубцы, открывающиеся и закрывающиеся, как челюсть, и позволяющие безболезненно вносить изменения в красные кровяные клетки. Верхние зубцы этих постоянно "жующих" микроустройств движутся вперед-назад, напоподобие пистона, вдоль микроканала, захватывая кровяные клетки с помощью зубцов нижнего ряда. Управляется "челюсть" электростатическими актюаторами. Опытный образец микроструйного прибора позволяет выполнять механические действия на клеточном уровне, ежесекундно делая "пункцию" 10 клеткам. Благодаря малым размерам (10 полностью собранных приборов умещаются в штыре электрического соединителя) в небольшом пространстве можно размещать несколько параллельно работающих устройств.

Микроустройства изготавливаются по разработанной в Сандийской лаборатории технологии MEMS SUMMIT V – последовательности операций осаждения пленок и литографии, позволяющей быстро реализовывать пятиуровневые микроэлектромеханические конструкции. Изолиро-

Взаимодействует с кровяными клетками

ванные микроканалы выполнены из нитрида кремния – материала, хорошо известного в полупроводниковой технике.

Новое устройство первоначально планируется использовать для выяснения способности "зажеванных" клеток поглощать флуоресцирующий материал. Положительный результат подтвердит возможность создания первого в мире механического мембранного устройства "пробивания" живых клеток. В дальнейшем зубцы будут заменены иглами, которые в ходе лечения или восстановления утраченных человеком функций смогут инжестировать в живые клетки молекулы DNA, RNA или белков (в том числе и молекулы лекарств).

www.Sandia.gov/LabNews/LN06-29-01/key06-29-01_stories.html

Уменьшим размеры ИС

Улучшим ESD-защиту

Фирма Sarnoff предлагает технологию, позволяющую значительно уменьшить размеры кристалла с ИС за счет "усушки" расположенных на нем устройств ввода/вывода сигналов и защиты от статического заряда. Технология, названная TakeCharge! (хватай заряд), позволит изготовителям ИС размещать на кристалле большее число активных устройств, сократив тем самым издержки производства и увеличив доходы, по оценкам разработчиков, до 100 долл. на обработанную пластину. И это без введения дополнительных операций маскирования или внесения изменений в технологический процесс. Предложенная технология позволяет уменьшить площадь, занимаемую схемами ввода/вывода и защиты от статического заряда, на 30% при одновременном улучшении их характеристики на 30–60%.

Новая технология была опробована при производстве КМОП-схем с 0,35-, 0,25-, 0,18-, 0,13- и 0,11-мкм топологическими нормами. Изготавливаемые по ней схемы с 0,25-мкм нормами выдерживали до 10 тыс. повторяющихся электростатических разрядов с максимальным напряжением 8 кВ. Sarnoff уже заключила лицензионные соглашения на передачу новой технологии компаниям Toshiba и Hynix Semiconductor.

www.edtn.com/story/OEG20010828S0059