

нулю. Ток АБ также равен нулю, и заряда АБ не происходит. Начиная с момента времени t_1 СБ начинает генерировать мощность. С ростом мощности СБ растет ток заряда АБ. На интервале времени $[t_1 \div t_2]$ система работает в режиме экстремального регулирования. В момент времени t_2 ток заряда АБ достигает задаваемого уровня ограничения, поэтому на интервале $[t_2 \div t_3]$ контроллер заряжает АБ постоянным током. В момент времени t_3 напряжение АБ достигает максимально допустимой величины, поэтому на интервале $[t_3 \div t_4]$ контроллер заряжает АБ падающим током. К моменту времени t_4 ток АБ становится равным нулю, следовательно, заряд АБ прекращается.

Поскольку в данной модели нагрузка отсутствует, и, следовательно, ток нагрузки равен нулю, в тестировании не рассмотрен режим разряда АБ.

Таким образом, убеждаемся, что модель функционирует в соответствии с алгоритмами, оговоренными в постановке задачи.

Разработана модель контроллера солнечной батареи с использованием функциональных блоков в программном пакете автоматизированного проектирования MATLAB 7.9. Она обеспечивает возможность задавать ток заряда аккумуляторной батареи в трех режимах работы: экстремального регулирования, заряда аккумуляторной батареи постоянным током и заряда аккумуляторной батареи падающим током, что подтверждают результаты тестирования.

Эта модель контроллера может быть использована в составе моделей систем электропитания для решения задач, связанных с обеспечением энергобаланса и отработки алгоритмов управления в таких системах.

Библиографические ссылки

1. Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов / М. В. Лукьяненко и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.
2. Иванчура В. И., Чубарь А. В., Пост С. С. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания // Научный журнал СФУ. Секция «Техника и технология». 2012. Т. 5. № 2. С. 179–190.
3. Implementgenericbatterymodel [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/battery.html>.
4. Пост С. С., Краснобаев Ю. В., Чубарь А. В. Разработка и исследование энергетических моделей импульсных стабилизаторов напряжения // Вестник СибГАУ. 2012. № 1 (41). С. 48–52.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Simulink и SimPower Systems. М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008.
6. Культин Н. Б. С++ в задачах и примерах. СПб. : БХВ-Петербург, 2006.

© Иванчура В. И., Краснобаев Ю. В., Чубарь А. В., Пост С. С., 2013

УДК 669.713.7

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ» КОНСТРУКЦИЙ ФОРМО- И РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. Лихачев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1. E-mail: alikhachev@yandex.ru

Представлены методологические аспекты, лежащие в основе создания «интеллектуальных» конструкций (ИК) на основе диэлектрических полимерных материалов, применяемых в системах космических аппаратов для обеспечения их формо- и размеростабильности. Рассматриваются вопросы математического моделирования таких систем, а также подходы, связанные с экспериментальными исследованиями таких систем. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований таких материалов и систем, позволяющих осуществлять проектировочный анализ таких систем

Ключевые слова: «интеллектуальная» конструкция, эластичные диэлектрические материалы.

FEATURE OF DEVELOPMENT OF “INTELLIGENT” CONSTRUCTIONS OF SHAPE- AND DIMENSION-STABLE STRUCTURES OF SPACE VEHICLES FROM DIELECTRIC POLYMER MATERIALS

A. N. Likhachev

Baltic State Technical University “VOENMEKh” named after D. F. Ustinov
1 1-ya Krasnoarmeyskaya street, Saint-Petersburg, Russia, 190005. E-mail: alikhachev@yandex.ru

The paper presents methodology aspects which are the basis for development and design of “intelligent” shape- and dimension- stable structures of space vehicles, made from dielectric polymer materials. Problems of mathematical simulation

of such systems are considered, along with approaches connected to experimental investigations of such materials and systems. Methodology of design of "intelligent" structures made from dielectric polymer materials is developed.

Keywords: "intelligent" structures, elastic dielectric materials.

Современный этап развития космической техники характерен созданием космических аппаратов (КА) и систем, обладающих уникальными функциональными свойствами и работающих, как правило, в экстремальных условиях внешней среды. Устойчивая тенденция к увеличению габаритных размеров, массы и энергооборуженности, наряду с увеличением сроков активного существования КА и высочайшими требованиями, выдвигаемыми к функциональным характеристикам таких объектов, приводит к системным противоречиям, которые сложно разрешить традиционными методами. Вышеупомянутые факторы приводят к необходимости управления характеристиками КА, в том числе и напряженно-деформируемым состоянием (НДС) конструкции в процессе ее эксплуатации. Одним из принципиальных подходов к решению этих проблем является создание нового поколения КА основанного на новой идеологии проектирования такого рода объектов, которая лежит в русле организации управляемых «интеллектуальных» конструкций [1]. В работе рассматриваются вопросы математического и физического моделирования «интеллектуальных» конструкций КА на основе использования в качестве актуаторов и сенсоров эластичных диэлектрических материалов (ЭДМ). ЭДМ является преобразователями электрической энергии в механическую. Преобразование происходит по средствам сжатия материала кулоновскими силами в одном направлении, что приведет к удлинению в остальных направлениях. При этом возникает давление

$$p = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (U/\delta)^2, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; U – напряжение между обкладками конденсатора; δ – толщина диэлектрика [2].

В процессе исследования для оценки деформации диэлектрического эластомера были рассмотрены несколько «гиперупругих» моделей, в рамках которых можно описать большие деформации ЭДМ, что связано со способностью этих материалов достигнуть относительных деформаций более 500 %.

В основе таких моделей лежит положение о том, что упругие свойства материала можно описать с помощью плотности энергии деформации W . В общем случае она является функцией трех инвариантов левого тензора деформации Коши–Грина. Были рассмотрены полиномиальная модель Рональда Ривлина, модифицированная модель Гука, модель Муни–Ривлина, модель Йео, модель Джента, модель Арруда–Бойса, Модель Огдена [3]. Для каждой модели было определено выражения для силы, возникающей на концах образца при плоском растяжении, и проведено исследование согласования этих моделей с экспериментальными данными.

С этой целью была разработана экспериментальная

методика исследования деформационных и силовых характеристик актуаторов, изготовленных на основе ЭДМ. Исследования происходили на специально разработанной экспериментальной установке, позволяющей осуществлять ряд технологических и метрологических операций над образцами ЭДМ. Данная установка позволяет производить предварительные удлинения образца ЭДМ в двух направлениях, для чего на стенде имеются горизонтальные и вертикальные направляющие. Оценка деформации образца ЭДМ осуществлялась с помощью метода делительных сеток, позволяющего оценить величину деформации образца с использованием бесконтактного оптического метода, основанного на регистрации картины изменения геометрии реперной сетки в процессе её смещения (рис. 1).

Используя экспериментальные данные, рассмотрено влияние краевых зон на работу актуатора. Определена зависимость одноосного удлинения от прикладываемой к образцу силы и подобрана на основании этих данных математическая модель, описывающая эту зависимость. Исследование актуатора на основе ЭДМ показало наличие гистерезиса материала образца. При исследовании деформации образца ЭДМ были выявлены две характерные зоны, в которых наблюдался различный по характеру процесс деформации материала. В первой из них характер деформации был неравномерен по площади зоны, тогда как во второй, относящейся к центральной части образца, деформация была равномерна. Разработана полуаналитическая модель, позволяющая оценить вклад «неравномерной» области в общий силовой баланс работы актуатора. Исследованы зависимости перемещение – сила для одноосного удлинения образца ЭДМ. Предложены выражения связывающие удлинение образца с величиной нагружающей образец силы.

В результате исследований из семи рассмотренных моделей, выделено, пять зависимостей, позволяющих согласовать расчетные и экспериментальные данные. Созданы алгоритм и программы подбора коэффициентов, согласования для различных моделей. Подбор коэффициентов показал, что модели Гука, Джент, Арруда–Бойса удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными лишь для относительных удлинений до 100 %. Модели Йео при $n = 2$ до 200 %, Йео при $n = 3$ около 300 %. Наилучшее согласование получено для модели Огдена (2), позволяющей корректно описать деформацию образца до 500 % (рис. 2):

$$f_{11} = Y_0 \cdot Z_0 \cdot [\mu_1 \cdot (\lambda_1 + 1)^{\alpha_1 - 1} + (\lambda_1 + 1)^{\alpha_1 + 1} + \mu_2 \cdot [(\lambda_1 + 1)^{\alpha_2 - 1} + (\lambda_1 + 1)^{-(\alpha_2 + 1)}], \quad (2)$$

где Y_0 , Z_0 – начальные размеры образца в направлении осей Y и Z ; μ_1 , μ_2 – константы материала; α_1 , α_2 – экспериментальные константы; λ_1 – относительное удлинение в направлении оси X .

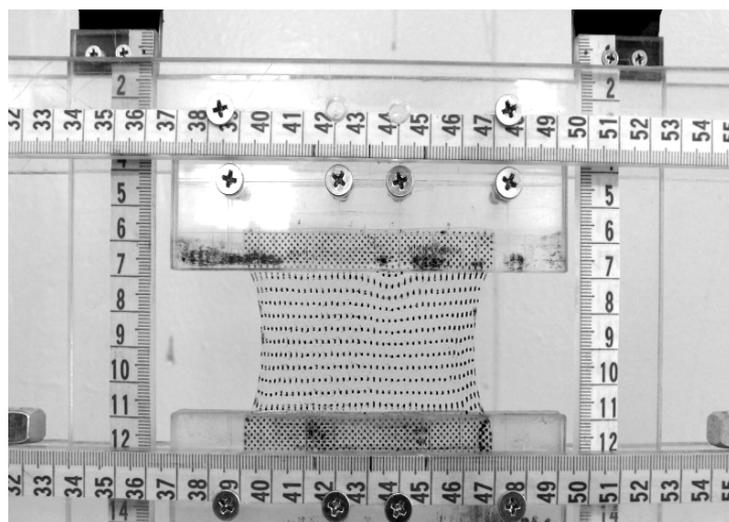


Рис. 1. Экспериментальный образец ЭДМ с нанесенной реперной сеткой

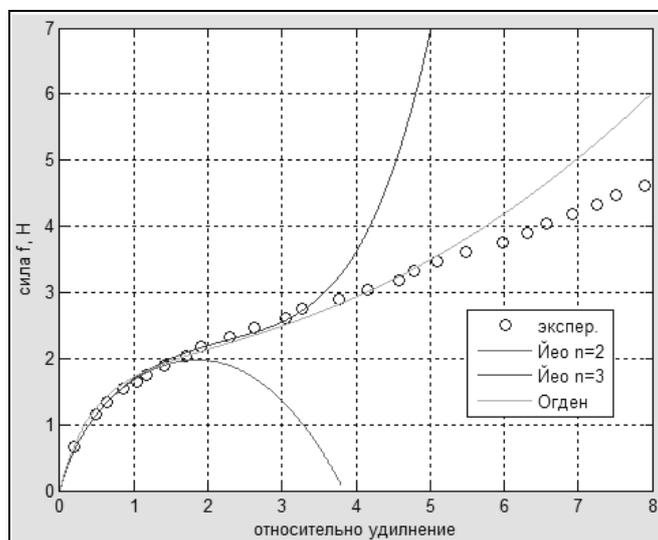


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и теоретических данных зависимости усилия растяжения от относительного удлинения

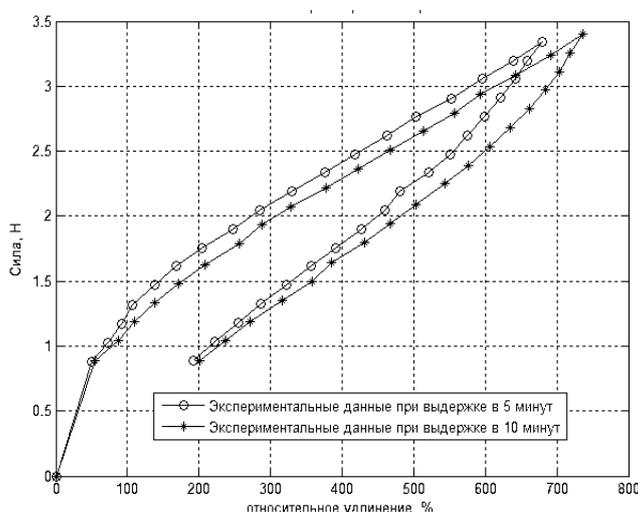


Рис. 3. Зависимости усилия растяжения от относительного удлинения при циклическом нагружении образца для различных времен выдержки между нагружениями

Обнаружено, что константы материала по модели Огдена для одноосного растяжения не соответствуют константам для двuosного растяжения, что, по-видимому, связано со значительным различием искривления краев образца при одноосном и двuosном растяжении и изменении внутренней структуры материала. Были проведены исследование деформации образца ЭДМ под действием приложенного к нему электрического напряжения.

Предварительно образец был растянут в 4 раза в одном направлении и в 3,3 раза во втором направлении. После определения перемещения, под действие напряжения, образцу давали вернуться в исходное положение, после чего к нему прикладывалось новое значение напряжения. Напряжение подавалось с помощью высоковольтного блока питания, в диапазоне от 900 до 2500 В с шагом в 100 В. Результаты, исследования показали наличие существенного гистерезиса материала (рис. 3).

Проведены работы по численному моделированию таких систем для плоских и балочных образцов ЭДМ, на основе метода КЭ, позволившие оценить влияние геометрических размеров, физико-механических и электрических характеристик актуаторов на их напряженно-деформированное состояние.

Разработаны теоретические модели ЭДМ, позволяющие осуществить проектирование актуаторов на их основе. Используя подходы, базирующиеся на оценке свободной энергии Гельмгольца, определены безразмерные характеристики такой системы, описывающие основные конструктивные показатели ЭДМ [4]. В частности, получены выражения, связывающие усилие P , развиваемое актуатором на основе ЭДМ, и напряжение питания актуатора U с величиной заряда Q на его электродах и физико-механическими характеристиками ЭДМ:

$$P/(G \cdot \varepsilon \cdot Z_0 \cdot Y_0) = \lambda_1 - t - (1/t) \cdot (Q^2/G \cdot \varepsilon \cdot X_0^2 \cdot Y_0^2) + s \cdot (\lambda_1 - \lambda_1^P), \quad (3)$$

$$U \cdot (\varepsilon/\mu)^{1/2} = (Z_0/d) \cdot \Delta, \quad (4)$$

где $t = \lambda_1^{-3} \cdot (\lambda_2^P)^{-2}$, $d = (\lambda_1 \cdot \lambda_2^P)^2$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – относительные удлинения ЭДМ в направлении осей X, Y, Z ; $s = K \cdot X_0/(G \cdot Z_0 \cdot Y_0)$ – безразмерный коэффициент жесткости актуатора, $\Delta = Q/[X_0 \cdot Y_0 \cdot (G \cdot \varepsilon)^{1/2}]$; K – коэффициент жесткости механической части актуатора (пружины), G – модуль сдвига ЭДМ.

Эти выражения позволяют оценить влияние степени предварительной деформации ЭДМ (λ_1^P, λ_2^P), приложенного электрического напряжения U , жесткостных (K, G) и геометрических характеристик актуатора на его силовые и деформационные показатели. С использованием предложенного подхода разработана модель оценки работоспособности таких актуаторов на основе анализа термодинамических характеристик такой системы и определены критические параметры разрушения конструкции. Для анализа оптимального рабочего состояния актуатора введен параметр, названный коэффициентом актуации: $\eta = \lambda^{pas}_1 / \lambda^0_1$, характеризующий предельное значение удлинения системы, где λ^{pas}_1 – максимальное значение удлинения ЭДМ, λ^0_1 – при напряжении питания, равном нулю. Наличие оптимума для η , позволяет выделить наиболее рациональную зону рабочих характеристик актуаторов на основе ЭДМ для получения эффективных функциональных показателей проектируемой системы (рис. 4). Эта область ограничена, с одной стороны, зоной электромеханической нестабильности материала (ЭМН), зоной электрического разрушения (пробоя) (ЭР) и областью потери устойчивости конструкции актуатора, а с другой – значениями возможной допустимой деформации ЭДМ (для данного материала $\lambda^{pas}_1 = 5$).

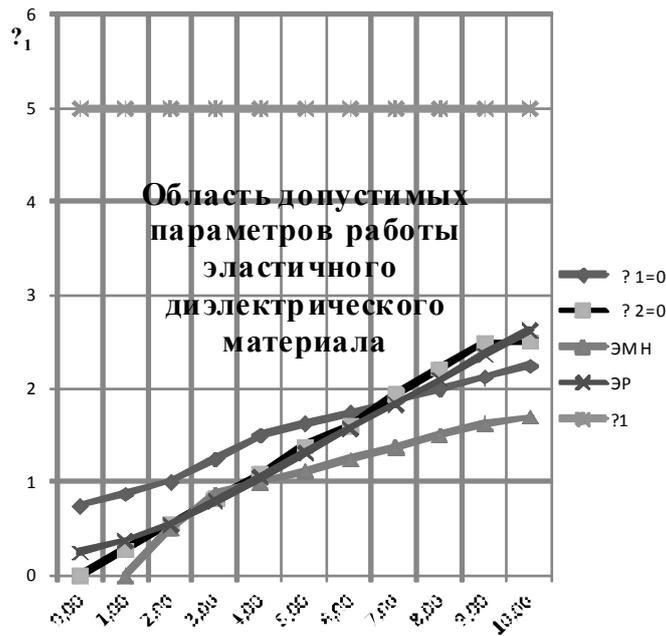


Рис. 4. Влияние физико-механических и конструктивных параметров актуатора на рабочую область

В результате проведенных исследований ЭДМ разработаны полуаналитические подходы, описывающие распределение толщины по поверхности краевых зон растянутого образца. Выделены зоны с равномерной и неравномерной деформацией образца, приводящей к неравномерности толщины ДЭМ. Выявлено, что неравномерность распределения толщины образца приводит к неравномерности распределения электростатического давления по поверхности, что, в свою очередь, влияет на выходные характеристики актуатора (усилие, перемещение). Получены зависимости перемещение – сила ДЭМ – при одноосном растяжении. Рассмотрены несколько теоретических моделей, описывающих эту зависимость. Установлено, что модель Огдена наиболее совпадает с экспериментальными данными при относительном удлинении не более 500 %. Разработаны подходы для оценки влияния физико-механических и конструктивных параметров актуатора на основе ЭДМ. Показана возможность определения рациональной зоны рабочих характеристик актуаторов на основе ЭДМ, чтобы получить наиболее эффективные функциональные показатели проектируемой системы. Создана экспериментальная методика исследования ЭДМ и проведена серия экспериментальных исследований

для оценки влияния физико-механических характеристик материала на функциональные параметры актуатора. Экспериментально показана возможность осевого перемещения образца ДЭМ под действием электрического напряжения до 200 %.

Библиографические ссылки

1. Лихачев А. Н. Методологические основы создания «интеллектуальных» конструкций формо- и размеростабильных систем космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. В 2 ч. ; СибГАУ. Красноярск, 2011.
2. Pelrine R. E., Kornbluh R. D., Joseph J. P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation // Sens. Actuators, A 64 (1998). P. 77–78.
3. Holzapfel A. (2000). Nonlinear solid mechanics – a continuum approach for engineering. Chichester, UK : John Wiley & Sons
4. Christensen R. M. Theory of viscoelasticity: an introduction. New York : Academic Press, 1981.

© Лихачев А. Н., 2012

УДК 621.833.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕНЬЕВ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Р. С. Лукин¹, В. И. Усаков², Д. В. Вавилов¹, А. А. Иптышев³

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: rlukin88@yandex.ru

²ФГУП ЦКБ «Геофизика». Россия, 660041, г. Красноярск, ул. Киренского, 89. E-mail: adm@geockb.ru

³КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности»
Россия, 660021, г. Красноярск, ул. Карла Маркса, 134. E-mail: i@sf-kras.ru

Рассмотрено моделирование контактного взаимодействия зубьев волновой зубчатой передачи с коротким гибким колесом. Показано влияние рабочей нагрузки на характер контактного взаимодействия зубьев.

Ключевые слова: волновая зубчатая передача, кромоочный контакт, метод конечных элементов.

MODELING THE INTERACTION OF THE WAVE GEAR UNITS

R. S. Lukin¹, V. I. Usakov², D. B. Vavilov¹, A. A. Iptyshev

¹Siberian Federal University. 26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: rlukin88@yandex.ru

²CDB "Geophysics". 89 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: adm@geockb.ru

³Krasnoyarsk Regional Fund for scientific and technological activities
134 Karl Marx street, Krasnoyarsk, 660021, Russia. E-mail: i@sf-kras.ru

In the paper we examine modeling of teeth contact wave gear with short flexible wheel. Shows the impact of the workload on the character of the teeth contact.

Keywords: edge contact, finite element method.

Актуальной задачей при проектировании небслуживаемых механизмов приводов космических аппаратов является обеспечение заданного срока служ-

бы. Данная задача является одной из наиболее приоритетных в совокупности с задачей обеспечения минимальной массы и габаритов. Одним из основных