

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБЕЗВЕШИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ РАСКРЫТИИ

А. Г. ВЕРХОГЛЯД¹, С. Н. МАКАРОВ¹, В. М. МИХАЛКИН²,
М. Ф. СТУПАК^{1,3}, А. В. ШЕВЛЯКОВ¹

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук, 630058, Новосибирск, Россия,
E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

²Акционерное общество „Информационные спутниковые системы им. акад. М. Ф. Решетнева“,
662972, г. Железногорск Красноярского края, Россия

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, Новосибирск, Россия

Разработана активная система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций (КТК), предназначенная для наземной экспериментальной отработки системы раскрытия трансформируемых рефлекторов зонтичного типа диаметром до 48 м. Математическое моделирование и экспериментальная проверка работоспособности показали применимость такой системы. Система позволяет производить обезвешивание КТК, обладающих цилиндрической симметрией и содержащих до нескольких десятков нетрансформируемых перемещающихся частей. Цифровая система управления позволяет варьировать параметры проводимых испытаний и конфигурацию испытываемых объектов. Специализированные алгоритмы управления позволяют компенсировать силы трения в кинематической схеме системы обезвешивания. В ходе наземных экспериментальных исследований показано, что при обезвешивании нетрансформируемой части массой до 10 кг, перемещающейся с линейной скоростью до 2 м/мин, эффективное усредненное значение остаточного некомпенсированного веса не превышает 0,07 Н.

Ключевые слова: крупногабаритные трансформируемые конструкции, наземная экспериментальная отработка, система обезвешивания, остаточный некомпенсированный вес, датчик веса (натяжения троса), алгоритм пропорционально-дифференциально-интегрального управления, цифровая система управления

Введение. Современные космические аппараты (КА), как правило, содержат несколько крупногабаритных трансформируемых конструкций (КТК) — раскрывающиеся антенны, панели солнечных батарей и т.д. К ним, как и к другим агрегатам, устанавливаемым на КА, предъявляются жесткие требования по надежности срабатывания. Соответствие разработанных КТК этим требованиям устанавливается во время наземной экспериментальной отработки (НЭО). Однако условия при проведении НЭО космического аппарата существенно отличаются от условий эксплуатации КА на орбите. В первую очередь, это обусловлено наличием силы тяжести и соответственно дополнительных нагрузок на механизмы раскрытия, шарнирные узлы и элементы несущих конструкций. Так как существуют жесткие требования по весу, габаритам и энергопотреблению агрегатов КА, то зачастую узлы, рассчитанные на работу в невесомости, в наземных условиях не могут функционировать должным образом. Для определения возможностей функционирования устройств в условиях орбитального полета применяют математическое моделирование и НЭО. Главный недостаток математического моделирования — низкая достоверность результатов, связанная, в первую очередь, с трудностью

учета конкретных свойств различных устройств и механизмов. А для НЭО таких узлов требуется дополнительное стендовое оборудование, позволяющее минимизировать влияние силы тяжести и обеспечить корректные условия испытаний.

Общая идея обезвешивания состоит в том, что к отдельным частям КТК прикладываются вертикальные силы, равные весу этих конструкций, а точкой приложения сил должен быть центр масс части. Это условие необходимо выполнять во избежание приложения дополнительных моментов сил к обезвешиваемым конструкциям. При разработке стендового оборудования для обезвешивания КТК требуется решить следующие основные задачи:

- выбрать метод создания обезвешивающих сил;
- разработать конструкцию узла крепления системы обезвешивания;
- обеспечить независимость силы обезвешивания от положения обезвешиваемой конструкции в пространстве;
- минимизировать влияние „присоединенной массы“, т.е. инерционных свойств системы обезвешивания.

К настоящему времени запатентовано множество конструкций стендов обезвешивания. По методу создания обезвешивающих сил можно выделить:

- пассивные стенды, на которые воздействуют силы и моменты, создаваемые системой раскрытия КТК, а обезвешивание производится за счет системы противовесов, пружин и т.д. [1—3]. Недостатком таких стендов является влияние массы подвижных элементов конструкции на работу механизмов раскрытия;
- активные стенды, перемещение частей и механизмов которых обеспечивается приводами самого стенда, это позволяет минимизировать влияние перемещения частей стенда на работу механизма раскрытия [4—7].

Однако системы пассивного обезвешивания не обеспечивают перемещения обезвешиваемых конструкций во всех трех направлениях с одновременным увеличением диапазонов перемещений (величина перемещений может достигать десятков метров); увеличения максимальных значений скорости до нескольких метров в минуту и ускорений до единиц метров в секунду; учет возможного перераспределения обезвешиваемых масс (изменение положения центра масс обезвешиваемой конструкции).

В настоящей работе описан стенд активного типа для обезвешивания в ходе НЭО трансформируемых рефлекторов. Рефлектор антенны зонтичного типа образуется 12 жесткими спицами из углепластика, сходящимися к центру, между спицами натянуты гибкие элементы формообразующей структуры, к которым крепится сетеполотно из тонких токопроводящих нитей. Каждая спица состоит из трех звеньев, соединенных между собой шарнирами. Вес каждого звена может достигать 10 кг. В сложенном состоянии все звенья рефлектора параллельны друг другу. Раскрытие рефлектора происходит за несколько десятков минут. Вес каждой обезвешиваемой части может достигать 10 кг.

Постановка задачи и обоснование возможности ее решения. При НЭО для сохранения динамики объекта, как и в условиях невесомости, необходимо приложить постоянные усилия в центрах масс всех нетрансформируемых составных узлов. В таком случае гравитационное воздействие на объект скомпенсировано, а динамика его развертывания такая же, как и в условиях невесомости. Из этого условия следует, что необходимо создать ряд устройств, действующих независимо друг от друга; цель устройства — компенсация гравитационного усилия только в заданной точке подвеса. Поскольку подвешиваемый узел перемещается в составе объекта испытаний и имеет некоторую динамику, то развиваемое устройством подвеса усилие должно отвечать следующим требованиям:

- действовать строго вертикально (вдоль вектора тяжести). Для этого в устройстве подвеса необходим механизм, отслеживающий угол наклона троса и обеспечивающий перемещение устройства подвеса (УП) в горизонтальной плоскости для сохранения положения троса;

— амплитуда усилия обезвешивания (натяжения троса) не должна зависеть от траектории перемещения точки подвеса объекта, т.е. каждое устройство подвеса должно регулировать длину троса, оставляя усилие обезвешивания постоянным.

При малых перемещениях (в условиях работы обратной связи) усилия в горизонтальной плоскости, связанные с удержанием вертикальности троса, направлены перпендикулярно вектору усилия обезвешивания и создают пренебрежимо малые воздействия (проекция усилия при рассогласовании направления троса по вертикали, по закону косинуса малых углов, близких к 90° , может быть пренебрежимо малой), поэтому две системы управления — позиционирования в горизонтальной плоскости и управления усилием/выпуском троса — могут быть реализованы независимыми петлями обратной связи и их можно рассматривать по отдельности.

Управление углом наклона троса — технически простая задача, поскольку задать механическое перемещение по показаниям рассогласования угла наклона много проще, чем поддерживать постоянное усилие в условиях динамики объекта испытаний.

Сложность управления усилием натяжения при произвольном движении объекта заключается в необходимости компенсации присоединенной массы троса и механизмов его подачи. Типичная схема механизма устройства обезвешивания с подвижной кареткой приведена на рис. 1, где ДН — датчик натяжения троса, МР — привод приложения усилия к тросу (мотор + редуктор), $F_M(t)$ — усилие натяжения, развиваемое шкивом мотора, $F_{об}(t)$ — неизвестное внутреннее усилие взаимодействия локальной массы узла объекта с остальными компонентами объекта, $F_{дн}(t)$ — усилие натяжения троса, измеряемое ДН, $M_{пр}$ — масса груза-противовеса статического веса обезвешиваемого узла объекта, $M_{об}$ — масса статического веса обезвешиваемого узла объекта.

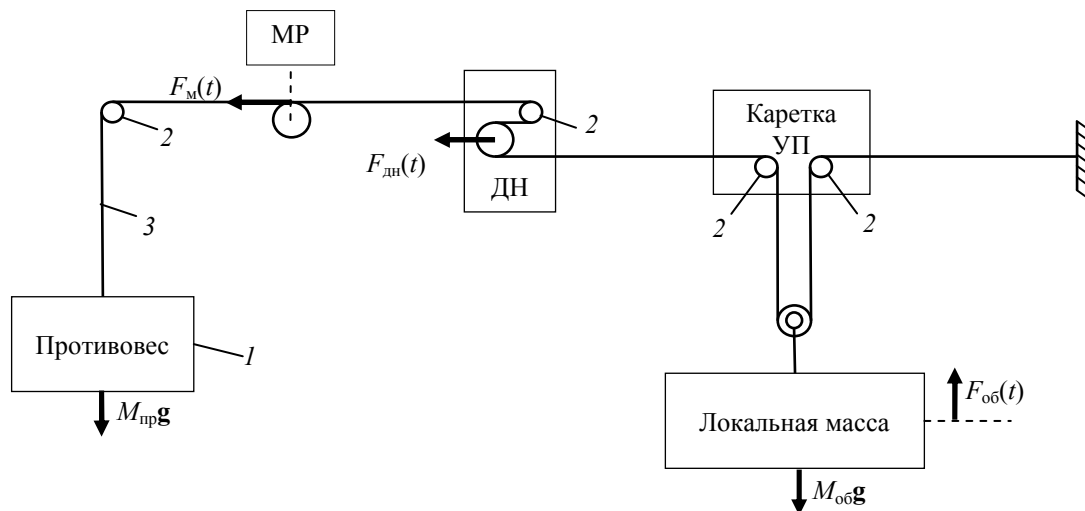


Рис. 1

Внутреннее усилие $F_{об}(t)$ вызывает декомпенсацию веса объекта, и объект ускоряется в точке подвеса. Чтобы проанализировать работу устройства, представленного на рис. 1, необходимо составить математическую модель. На рис. 2 приведена эквивалентная блок-схема для системы обезвешивания с обозначениями переменных состояния: 0 — статическая компенсационная масса, 1 — ролик между компенсационной массой и приводом приложения усилия к мотору, 2 — привод приложения усилия к тросу, 3 — вспомогательный ролик измерителя усилия, 4 — измеритель усилия натяжения троса, 5 — левый ролик каретки, 6 — ролик непосредственного крепления груза в точке подвеса, 7 — обезвешиваемый груз, 8 — второй ролик каретки подвеса, 9 — неподвижная точка фиксации троса; X_i — исходная координата механического узла (например, массы или ролика) вдоль ненагруженного троса, M_i — масса механического узла i , S_i — текущее смещение подвижных узлов относительно их соответствующей исходной координаты X_i , I_i — момент инерции соответствующих роликов,

R_i — рабочий радиус намотки троса для соответствующих роликов, A_i — текущий угол поворота для соответствующих роликов относительно их оси по отношению к начальному состоянию, L_i — текущая длина троса, соединяющего два смежных механических узла, в состоянии отсутствия нагрузки, D_i — текущая длина троса, соединяющего два смежных механических узла, в присутствии текущей нагрузки, T_i — текущее усилие натяжения соответствующего троса, F_0 — усилие, развиваемое компенсационной массой M_0 , F_1 — усилие, развиваемое объектом обезвешивания с массой M_7 (переменное во времени и включающее его вес), F_2 — усилие, измеряемое блоком измерения натяжения троса 4, F_3 — усилие, развиваемое приводом 2.

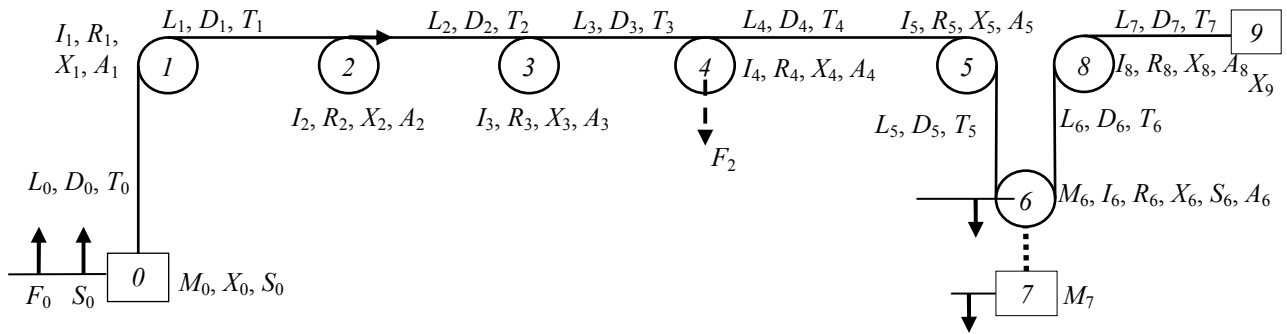


Рис. 2

Уберем из рассмотрения все малоинерциальные промежуточные ролики, находящиеся на небольших расстояниях от мотора и измерителя усилия, а также упростим модель каретки. Двигатель и измеритель усилия находятся вблизи, поэтому их считаем одним узлом (рис. 3).

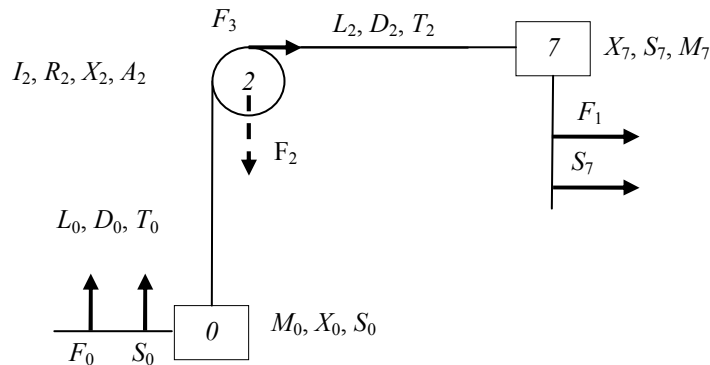


Рис. 3

Тогда уравнения состояния для упрощенной модели можно записать в виде

$$\frac{d^2 T_0}{dt^2} = \left(K_p T_2 + K_d \frac{dT_2}{dt} + T_2 - T_0 \right) \frac{k_1 R_2}{I_2} + k_2 \frac{T_0}{M_0},$$

$$\frac{d^2 T_2}{dt^2} = \left(K_p T_2 + K_d \frac{dT_2}{dt} + T_2 - T_0 \right) \frac{k_3 R_2}{I_2} + k_4 \frac{F_1 - T_2}{M_7},$$

где K_p и K_d — пропорциональный и дифференциальный коэффициенты усиления обратной связи PD-контроллера по отклонению натяжения троса от усилия статического веса T_2 , по которому задается усилие привода слежения: $F_3(t) = K_p T_2 + K_d \frac{dT_2}{dt}$. Оставшиеся константы определены как $k_1 = \frac{kR_2}{X_2 - X_0}$, $k_2 = \frac{-k}{X_2 - X_0}$, $k_3 = \frac{-kR_2}{X_7 - X_2}$, $k_4 = \frac{k}{X_7 - X_2}$, $k = ES$ — относительная линейная жесткость троса, выражаемая через модуль Юнга E и его характерное сечение S .

Решение задачи обезвешивания в подобной системе сводится к поиску таких коэффициентов в пропорционально-дифференциальном алгоритме управления контроллером, чтобы в некоторой рабочей полосе частот работы системы $\omega_{\min} < \omega < \omega_{\max}$ амплитуда натяжения троса T_2 была минимальна, т.е. $|T_2(\omega)| \rightarrow \min$. Необходимо изучить передаточную функцию $H(\omega)$ зависимости натяжения троса от внутреннего усилия, развиваемого в объекте: $H(\omega) = T_2(\omega)/F_1(\omega)$.

Были рассмотрены численные решения такой задачи при различных значениях K_p и K_d в алгоритме пропорционально-дифференциального регулирования, результаты решения при $K_p = 300$ и $K_d = 1000$ приведены на рис. 4. Можно сделать вывод, что в рабочей полосе частот обезвешиваемого груза $30 \geq \omega/2\pi \geq 0,1$ Гц схема работает удовлетворительно, относительный „шум усилия“ можно уменьшить до уровня 1 % от переменного усилия, создаваемого произвольным движением обезвешиваемого объекта. Исключением является рабочий диапазон частот, близкий к резонансной частоте подвешенного компенсационного груза.

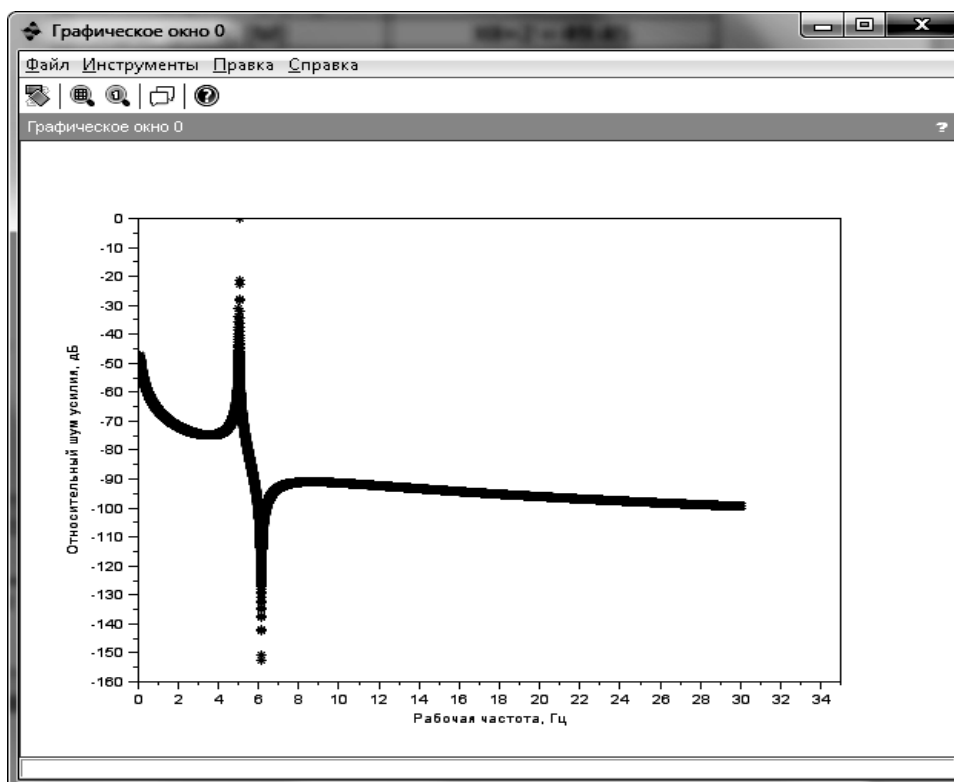


Рис. 4

Экспериментальный образец системы обезвешивания состоит из 12 радиально расходящихся из общего центра лучей (по числу спиц в обезвешиваемом рефлекторе). Каждый луч является, по сути, металлической направляющей, вдоль которой могут перемещаться три независимые каретки, для каждой из них на тросе размещается устройство подвеса обезвешиваемой части КТК. Точка подвеса может перемещаться за счет изменения длины троса с помощью управляемого сервопривода. Кроме того, имеется система слежения за отклонением троса от вертикали и компенсации этого отклонения путем перемещения каретки вдоль направляющей. Внешний вид экспериментального образца одного из лучей системы обезвешивания приведен на рис. 5.

В силу жестких требований на потребление энергии к системам развертывания трансформируемых антенн на борту КА, и следовательно их малой мощности, остаточный относительный „эффективный“ вес системы обезвешивания не должен превышать 0,2 %, что составляет 0,2 Н при весе обезвешиваемой конструкции 100 Н.



Рис. 5

При экспериментальном исследовании системы обезвешивания (масса груза 8058 г) были получены следующие результаты:

- воспроизводимость среднего показания датчика веса, Н, не хуже $\pm 0,02$;
- максимальный разброс показаний датчика веса, Н, при неподвижном обезвешиваемом изделии: не более $\pm 0,06$, при движущемся равномерно — не более $\pm 0,23$, в режиме обезвешивания движущегося груза — не более $\pm 0,54$;
- сила трения покоя в системе обезвешивания, Н, не более 10,0.

Возрастание разбросов показаний датчиков веса в случае равномерного движения груза объясняется изменением сил трения в подшипниках кинематической схемы системы обезвешивания при различных углах поворота. Сила трения в основном определяется качеством подшипников, применяемых в кинематической схеме. Эксперименты показали, что эта сила линейно нарастает со скоростью движения, и основная работа системы обезвешивания связана с компенсацией силы трения. Временные зависимости момента двигателя системы (кривая 2) обезвешивания, скорости обезвешиваемого объекта (кривая 1) и показания датчика веса приведены на рис. 6 при действии на обезвешиваемый объект силы $\delta F = 0,1$ Н и на рис. 7 при $\delta F = 0,5$ Н. Работа двигателей раскрытия рефлектора имитировалась добавлением некоторой массы к обезвешиваемому объекту или ее уменьшением.

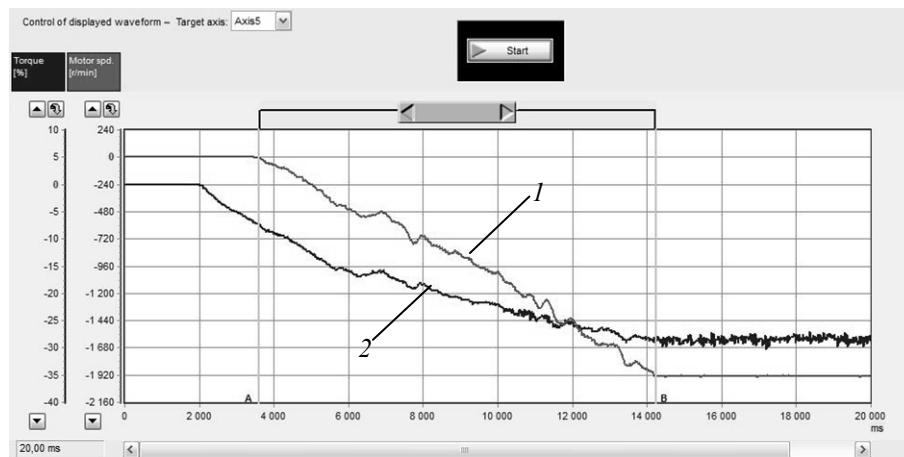


Рис. 6



Рис. 7

На обоих рисунках видно линейное со временем нарастание скорости обезвешиваемого объекта. Вычисленное по графикам ускорение с некоторой погрешностью равнялось $\delta F/M_0$, которая соответствовала величине необезвешенной массы порядка 5 г. Необходимо отметить, что речь идет о средних значениях обезвешиваемой массы, вычисленных за весь период работы. Максимальные отклонения (по сигналам с датчика веса) достигали 0,5 Н.

Заключение. В работе приведены предварительные результаты исследования разработанной системы обезвешивания для проведения НЭО трансформируемых антенн рефлекторов диаметром до 48 м. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

— предложенная активная система позволяет производить обезвешивание изделий с относительно низким усредненным остаточным весом (менее 0,2 %) в широком диапазоне скоростей пространственных перемещений (до 4 м/мин) и с большим числом (несколько десятков) обезвешиваемых элементов;

— изменение параметров настроек программного обеспечения позволяет адаптировать систему к различным условиям испытаний (изменение количества обезвешиваемых частей, введение параметров, имитирующих или компенсирующих вязкое трение);

— система легко трансформируема для испытаний объектов большого размера и с большим числом обезвешиваемых элементов.

Также необходимо отметить, что при НЭО большеразмерных трансформируемых объектов зачастую на результаты испытаний оказывает влияние так называемая „присоединенная масса“. Результаты оценочных расчетов показывают, что путем применения специализированных алгоритмов управления работой системы обезвешивания влияние „присоединенной массы“ можно значительно уменьшить, но этот аспект требует дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2299840 РФ. Устройство для обезвешивания секционных складных панелей солнечных батарей космического аппарата / А. Г. Вохмин, В. Н. Подзоров, И. Б. Полевко, Ю. Н. Сеченов. 2007. Бюл. № 15. 10 с.
2. Пат. 2372601 РФ. Стенд для обезвешивания горизонтально перемещающейся механической системы космического аппарата / А. И. Кирилюк, В. Н. Подзоров, А. Н. Евтеев. 2009. Бюл. № 31. 8 с.
3. Pat. 8,621,954 B1 US. System and methods for gravity compensation / B. Dellon, Y. Matsuoka. Date of Patent: Jan. 7, 2014. Appl. no.: 13/153,614. 16 p.
4. Пат. 2483991 РФ. Стенд раскрытия панелей солнечной батареи / В. В. Билько, Н. А. Плетнева, В. И. Сороколетов, Ю. П. Шуляк. 2013. Бюл. № 16. 9 с.
5. Pat. 2014/0041444 A1 US. Apparatus for antenna weightlessness development test / Choi Jang Sup, Kwak Chang Soo, Yom In Bok, Yhm Man Seok, Lee Hong Yeol, Yun So Hyeun. Pub. Date: Feb. 13, 2014. Appl. no.: 13/658,192. 11 p.
6. Пат. 2410299 РФ. Способ имитации пониженной гравитации / И. А. Кудрявцев. 2011. Бюл. № 3. 4 с.

7. Шевляков А. В., Куклин В. А., Холодов В. В. Многоканальная автоматическая система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых систем // Решетневские чтения: XVIII междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (Красноярск, 11—14 нояб. 2014 г.). Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 113—115.

Сведения об авторах

- Александр Григорьевич Верхогляд** — Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук; лаборатория лазерных промышленных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru
- Сергей Николаевич Макаров** — Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук; лаборатория лазерных промышленных технологий; старший научный сотрудник; E-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru
- Владимир Михайлович Михалкин** — Акционерное общество „Информационные спутниковые системы им. акад. М. Ф. Решетнева“, Отраслевой центр крупногабаритных трансформируемых механических систем; заместитель директора; E-mail: mikhalkin@iss-reshetnev.ru
- Михаил Федорович Ступак** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук; лаборатория лазерных промышленных технологий; старший научный сотрудник; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет; E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru
- Андрей Валерьевич Шевляков** — Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук; лаборатория лазерных промышленных технологий; ведущий программист; E-mail: ghost2613@mail.ru

Рекомендована лабораторией
лазерных промышленных
технологий КТИ НП СО РАН

Поступила в редакцию
26.08.15 г.

Ссылка для цитирования: Верхогляд А. Г., Макаров С. Н., Михалкин В. М., Ступак М. Ф., Шевляков А. В. Автоматическая система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций при раскрытии // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 2. С. 134—142.

**AUTOMATIC GRAVITY COMPENSATION SYSTEM
FOR LARGE-SIZE TRANSFORMABLE CONSTRUCTIONS DURING DEPLOYMENT**

**A. G. Verkhoglyad¹, S. N. Makarov¹, V. M. Mikhalkin²,
M. F. Stupak^{1,3}, A. V. Shevlyakov¹**

¹Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the RAS,
630058, Novosibirsk, Russia,
E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

²JSC Reshetnev Information Satellite Systems,
662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia

³Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia

Results of development and experimental testing of active gravity compensation system for large-size transformable are presented. The developed system is intended for the use in ground experimental adjustment of transformed deployable umbrella-type reflectors with a diameter of up to 48 meters. Mathematical modeling and experimental testing confirm the system usability and efficiency. The system provides compensation of gravity action on large-size transformable cylindrically symmetric constructions consisting of up to several tens of non-transformable moving parts. A digital control system allows flexible variation of the testing parameters and the tested object configuration. Application of specialized control algorithms can almost completely compensate for the friction forces inherent in kinematic scheme of the gravity compensation system and therefore reduce drastically the time of the system adjustment and preparation for testing. Preliminary experimental studies show that under gravity-compensation action on the non-transformed part

weighting up to 10 kg and moving with the linear speed of 2 m/min, the effective average value of residual uncompensated gravity force does not exceed 0.07 N.

Keywords: large-size transformable construction, ground experimental study, gravity compensation system, residual uncompensated weight, weight sensor (cable tension), algorithm of a proportional differential-integral control, digital control system

Data on authors

- Alexander G. Verkhoglyad** — Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the RAS; Laboratory for Laser Industrial Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru
- Sergei N. Makarov** — Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the RAS; Laboratory for Laser Industrial Technologies; Senior Scientist; E-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru
- Vladimir M. Mikhalkin** — JSC Reshetnev Information Satellite Systems, Industrial Center for Large-Sized Foldable Mechanical Systems, Deputy Director; E-mail: mikhalkin@iss-reshetnev.ru
- Mikhail F. Stupak** — PhD, Associate Professor; Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the RAS; Laboratory for Laser Industrial Technologies; Senior Scientist; Novosibirsk State University; E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru
- Andrei V. Shevlyakov** — Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the RAS; Laboratory for Laser Industrial Technologies; Senior Programmer; E-mail: ghost2613@mail.ru

For citation: Verkhoglyad A. G., Makarov S. N., Mikhalkin V. M., Stupak M. F., Shevlyakov A. V. Automatic gravity compensation system for large-size transformable constructions during deployment // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 2. P. 134—142 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-2-134-142