

ПРОБЛЕМА МИКРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Н. Саяпин^{1,2}

¹ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

S.Sayapin@rambler.ru

Рассмотрены причины возникновения проблемы микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов, связанной со скачкообразным увеличением модуля упругости материала при преодолении пороговых значений малых напряжений. Представлены экспериментальные данные испытаний на сжатие трубчатых образцов-свидетелей с площадью поперечного сечения $4,52 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, изготовленных из углепластика КМУ-4Л, на которых установлено скачкообразное увеличение модуля после прохождения пороговых значений малых напряжений. При этом средние значения модулей упругости на первом (от 0 до 5 кН) и последующих участках нагружения составили 7,375 ГПа и 158 ГПа соответственно. Показано, что при наземной отработке прецизионных крупногабаритных космических конструкций вследствие погрешности применяемых систем обезвешивания остаточные нагрузки на их элементы превышают значения указанных малых нагружений. В результате при малых нагружениях, возникающих в условиях орбитального полета, расчетные значения модуля упругости прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов могут оказаться выше реальных более чем в 20 раз и, соответственно, реальные упругие деформации конструкций могут быть существенно выше расчетных и превышать допустимые значения. Таким образом, при использовании высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов в прецизионных крупногабаритных космических конструкциях, например, высокоточных параболических зеркалах из углепластика диаметром 10 м и более с точностью рабочей поверхности не уже 10 мкм, необходимо учитывать их микродинамическую чувствительность к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям в условиях полета. Показаны возможные пути решения проблемы.

Ключевые слова: микродинамическая чувствительность, прецизионные КГКК из высокомодульных ВПКМ, системы обезвешивания

Ссылка для цитирования: Саяпин С.Н. Проблема микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 23–31.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-23-31

Применение высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) в прецизионных крупногабаритных космических конструкциях (КГКК) обусловлено их высокой удельной жесткостью и низким значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). В работе [1] представлены сравнительные характеристики высокомодульных ВПКМ, из которых следует, что наиболее предпочтительными для изготовления несущих и формообразующих элементов прецизионных КГКК являются углепластики. К прецизионным КГКК прежде всего следует отнести космические радио- и оптические телескопы диаметром 10 м и более. В силу своей протяженности и ограничений по размерам поперечных сечений они относятся к низкочастотным упругим конструкциям (0,1...5,0 Гц). При этом требования к их геометрической точности неуклонно возрастают. Так, например, в РФ ведутся работы по созданию космической обсерватории «Миллиметрон»

с главным параболическим зеркалом (ГПЗ) диаметром 10 м из высокомодульного ВПКМ — углепластика (рис. 1) [2]. Геометрическая точность ГПЗ при всех условиях эксплуатации должна быть не хуже 10 мкм. В результате космическая обсерватория и другие прецизионные КГКК становятся микродинамически чувствительными системами к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям (рис. 2) несмотря на их малые значения [2–4].

Здесь под микродинамической чувствительностью прецизионных КГКК следует понимать нарушение геометрической точности их формообразующих элементов от внешних и внутренних микродинамических воздействий в процессе эксплуатации. Очевидно, что для снижения микродинамической чувствительности прецизионных КГКК необходимо снижать значения внешних и внутренних микродинамических воздействий, с одной стороны, и разрабатывать оптимальные схемы армирования прецизионных формообразующих

элементов КГКК из ВПКМ, обеспечивающие максимальный модуль упругости при минимальном значении ТКЛР — с другой [2, 3]. В то же время даже при допустимых нагрузках может возникать микродинамическая чувствительность прецизионных КГКК к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям, связанная непосредственно с самим высокомодульным ВПКМ после его полимеризации, которая слабо зависит от выбранной схемы армирования изделия, подавляется в наземных условиях силой тяжести и способна проявиться лишь в условиях невесомости. Такая микродинамическая чувствительность возникает в случаях, когда пороговые напряжения в ВПКМ от внешних и внутренних микродинамических воздействий еще недостаточны для полного включения в работу высокомодульных армирующих волокон, а величина деформирования длинномерных формообразующих прецизионных элементов, например, лепестков ГПЗ и опор контррефлектора космической обсерватории «Миллиметр» (см. рис. 1) выходит за пределы допустимых значений прецизионности КГКК [3, 4].

Ниже представлено описание проблемы микродинамической чувствительности и возможные пути ее решения.

Цель работы

Цель работы — выявление и описание проблемы микродинамической чувствительности прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ и возможные пути ее решения.

Материалы и методы

Проблема микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов. В процессе проектирования прецизионных формообразующих элементов КГКК из высокомодульных ВПКМ выполняют предварительные расчеты, используя значения модуля упругости для выбранной схемы армирования, взятые из справочной литературы, которые впоследствии уточняют после проведения соответствующих испытаний на образцах-свидетелях.

Такой подход вполне корректен при изготовлении длинномерных элементов конструкций из ВПКМ с допустимыми значениями деформаций не более нескольких миллиметров. Например, в настоящее время успешно эксплуатируется космический радиотелескоп (КРТ) «Радиоастрон» (рис. 3), включающий в себя развернутое на орбите параболическое зеркало диаметром 10 м и фокальным расстоянием 4,22 м, составленное из центральной части диаметром 3 м и 27 консольных радиальных лепестков.

Центральная часть, лепестки и опора фокального блока изготовлены из углепластика. При этом максимальное отклонение рабочей поверхности параболического зеркала от теоретической поверхности не превышает 2 мм [3–7]. В процессе отработки процесса раскрытия лепестков, контроля геометрической точности рабочей поверхности параболического зеркала, а также юстировки антенны КРТ применялась система обезвешивания, снижающая деформацию ее формообразующих элементов до допустимых пределов (см. рис. 3). Высокие значения модулей упругости стержней опоры фокального блока и несущих элементов консольных лепестков из углепластика обеспечили им требуемую жесткость, несмотря на имеющую место погрешность системы обезвешивания.

В процессе создания КРТ «Радиоастрон» был изготовлен полномасштабный прототип варианта шестистержневой опоры фокального блока (рис. 4) [3, 4, 7, 8]. Каждый из стержней снабжен дифференциальным винтом и сферическим шарнирами на концах, которые позволяют обеспечивать точное регулирование его длины воспринимать нагрузку только на растяжение и сжатие. В результате шестистержневая опора фокального блока представляет собой пространственный механизм параллельной структуры с 6DoF подобный платформе Стюарта [9], обладающий геометрической неизменяемостью своей формы после фиксации дифференциальных винтов. Согласованное изменение длин стержней путем вращения их дифференциальных винтов позволило организовать юстировку облучателей, жестко связанных с фокальным блоком, относительной несущей конструкции космического аппарата с параболическим зеркалом.

Цельные длинномерные трубчатые стержни с внутренним диаметром 32 мм и схемой армирования $+80^0_1/0^0_{24}/-80^0_1$ изготовлены из углепластика КМУ-4Л путем поперечной намотки и продольной выкладки препрега ЛУП-0,2, пропитанного связующим ЭНФБ с использованием оригинальной оснастки [3, 8]. Испытания на сжатие проводились на образцах-свидетелях, отрезанных от концевых участков заготовок трубчатых стержней. При этом высота каждого образца-свидетеля из условия обеспечения устойчивости при сжатии составляла 60 мм при площади поперечного сечения $4,52 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ [2–4, 7]. Испытания на сжатие проводились в диапазоне от 0 до $0,5 \times 10^2$ кН с шагом изменения нагрузки 5 кН. Среднее значение модуля упругости образцов-свидетелей на первом участке нагружения в диапазоне от 0 до 5 кН составило 7,375 ГПа, что соизмеримо со справочными данными для связующего ЭНФБ (3,6 ГПа) [10]. При дальнейшем нагружении образцов-свидетелей свыше 5 кН произошло скачкообразное

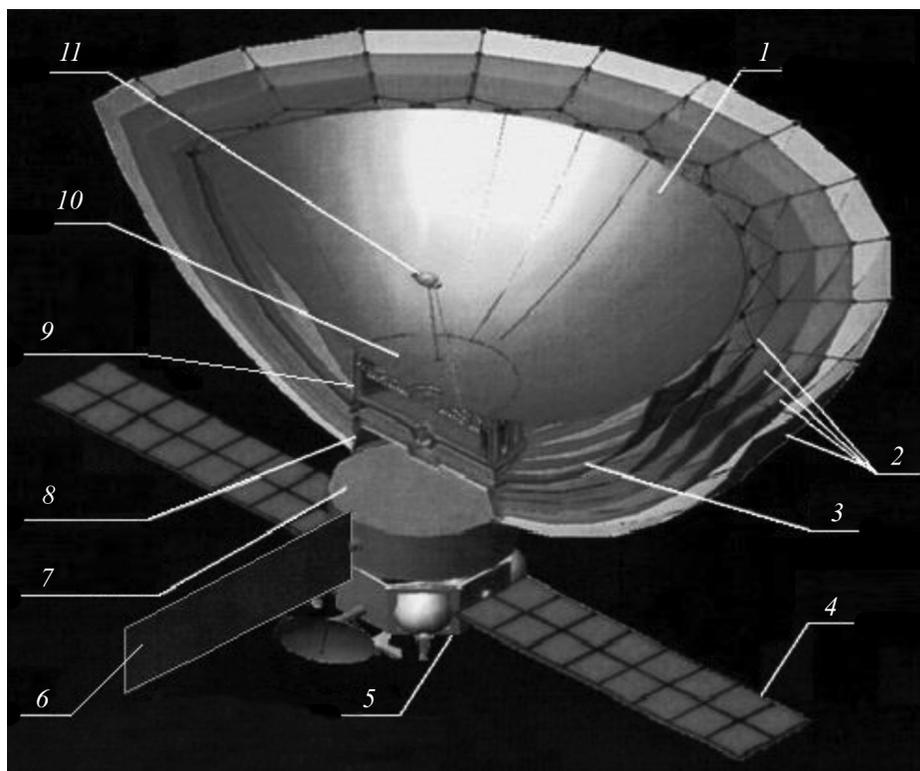


Рис. 1. Общий вид космической обсерватории «Миллиметрон»: 1 — лепестки рефлектора; 2 — система теплозащитных экранов; 3 — криоэкран; 4 — солнечные батареи; 5 — служебный модуль; 6 — радиатор; 7 — неохлаждаемый отсек; 8 — опора теплозащитных экранов; 9 — опорная ферма рефлектора с охлаждаемым контейнером; 10 — центральное зеркало; 11 — контррефлектор с опорами

Fig. 1. General view of the Millimetron space observatory: 1 — reflector lobes; 2 — a system of heat shields; 3 — cryoscreen; 4 — solar panels; 5 — service module; 6 — a radiator; 7 — uncooled compartment; 8 — support heat shields; 9 — supporting truss of a reflector with a cooled container; 10 — a central mirror; 11 — counterreflector with supports

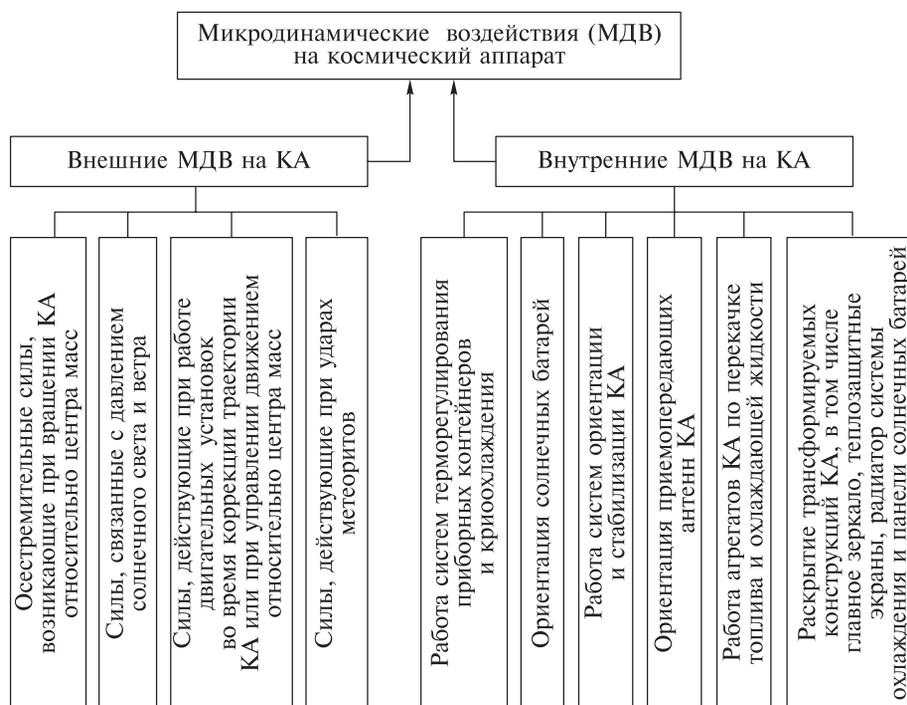


Рис. 2. Внешние и внутренние микродинамические воздействия на космический аппарат
Fig. 2. External and internal microdynamic effects on the spacecraft

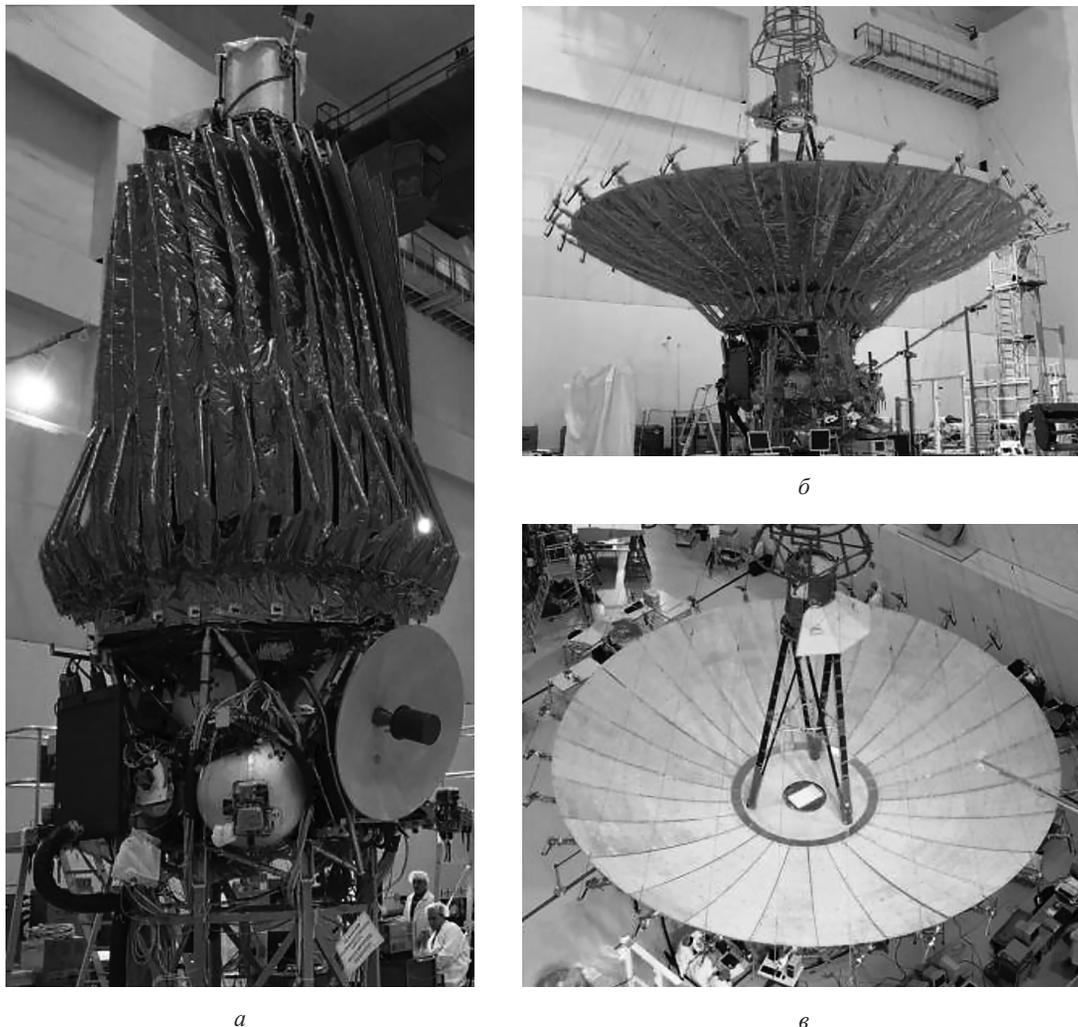


Рис. 3. Антенна космического радиотелескопа «Радиоастрон» в сложенном (а) и раскрытом (б, в) положениях
Fig. 3. The antenna of the Radioastron space radio telescope in the folded (a) and open (б, в) positions

увеличение модуля упругости до значения 158 ГПа, которое сохранялось вплоть до верхнего порога нагружения ($0,5 \times 10^2$ кН), что хорошо согласуется с регламентированным значением модуля упругости однонаправленного углепластика на основе препрега ЛУП-0,2, пропитанного связующим ЭНФБ (157 ± 25) ГПа [11]. На рис. 5 представлен график зависимости продольной деформации от нагрузки при сжатии образца-свидетеля, построенный по результатам испытаний. Таким образом, можно утверждать, что при малых напряжениях в образце-свидетеле в формировании модуля упругости углепластика участвует малое количество продольных углеродных волокон вследствие искривления продольных волокон в процессе формования изделий [1]. Предварительное натяжение продольных волокон приводит к тому, что после полимеризации они становятся частично растянутыми, а связующее — сжатым [12]. При нагружении образца-свидетеля свыше 5 кН в формировании модуля упругости принимают

участие все продольные волокна, и продольный модуль упругости скачкообразно увеличивается до расчетного значения [1, 10, 11].

В процессе наземной отработки КГКК для снижения влияния веса элементов конструкций на процесс их раскрытия и снижения величины деформаций их формообразующих элементов используют системы обезвешивания различных типов [13]. При этом, в зависимости от конфигурации и типа КГКК, погрешность системы обезвешивания может достигать 15 % [3, 13]. В результате напряжения от динамических и статических нагрузок, действующих на обезвешенные элементы КГКК из высокомодульных ВПКМ, существенно превосходят величины напряжений, соответствующих нагрузкам на участке малых напряжений от 0 до 5 кН (см. рис. 5). Вследствие этого неprecизионные КГКК не могут быть отнесены к механическим системам с микродинамической чувствительностью, поскольку деформации от внешних и внутренних микроди-

намических воздействий в космических условиях значительно ниже допустимых. Так, например, несмотря на применение систем обезвешивания при наземных испытаниях, конструкция антенны из углепластика КРТ «Радиоастрон» (см. рис. 3) не относится к прецизионным КГКК с микродинамической чувствительностью, так как допусковое отклонение геометрии ее крупноразмерных (длиной 3 м и более) формообразующих элементов от теоретической составляет ± 2 мм [5, 6]. В то же время прецизионные КГКК, точность которых в сотни раз выше, становятся микродинамически чувствительными системами и требуют особых подходов к их созданию. При наземной отработке прецизионных КГКК вследствие погрешности применяемых систем обезвешивания остаточные нагрузки на их элементы превышают значения указанных выше малых нагружений, что неизбежно приводит к искажению экспериментальных данных о деформациях при моделировании условий эксплуатации. В результате при малых нагружениях, возникающих в условиях орбитального полета от внешних и внутренних микродинамических воздействий, расчетные значения модуля упругости прецизионных КГКК могут оказаться меньше реальных более чем в 20 раз (см. рис. 5), и реальные упругие деформации конструкций могут быть существенно выше расчетных и допустимых.

В работе [14] отмечается, что на малых уровнях микрогравитации декремент затухания шар-баллонов орбитальной станции «Мир», установленных на концах консольных ферм из ВПКМ составлял 0,03, а на больших — 0,3. Об этом же для панелей солнечных батарей космического аппарата, указано в работе [15], что может свидетельствовать о наличии микродинамической чувствительности прецизионных протяженных элементов из высокомодульных ВПКМ при внешних и внутренних микродинамических воздействиях в условиях орбитального полета. Поэтому при расчетах следует учитывать значения модуля упругости, полученного при малых нагружениях образцов-свидетелей. Таким образом, при использовании высокомодульных ВПКМ в прецизионных КГКК важен учет их микродинамической чувствительности к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям в условиях эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Возможные пути решения проблемы микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций из высокомодульных волокнистых полимерных композиционных материалов. Для решения указанной проблемы помимо усовершенствования технологии изготовления фор-

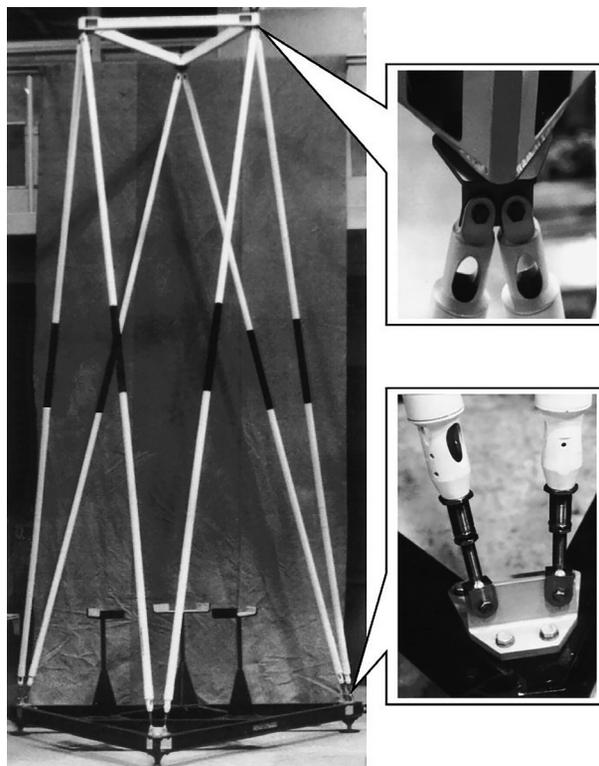


Рис. 4. Полномасштабный прототип шестистержневой опоры фокального блока из длинномерных углепластиковых стержней

Fig. 4. Full-scale prototype of the six-core focal block support made of long carbon fiber rods

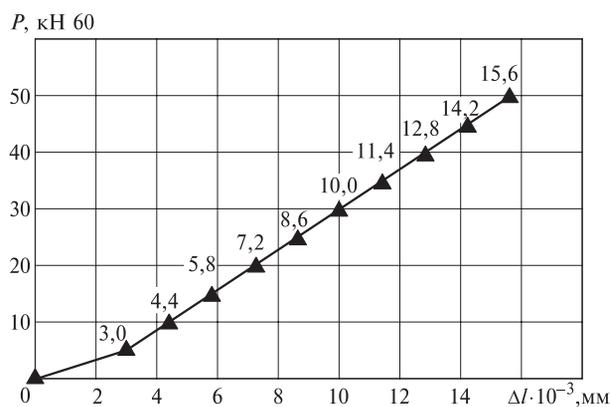


Рис. 5. Зависимость продольной деформации от нагрузки при сжатии образца-свидетеля из углепластика КМУ-4Л

Fig. 5. The dependence of the longitudinal strain on the load during compression of the witness specimen from carbon fiber KMU-4L

мообразующих элементов из высокомодульных ВПКМ, необходимо организационно и конструктивно снижать величины внешних и внутренних микродинамических воздействий и эффективно применять системы активной, полупассивной и пассивной виброзащиты от них и адаптивного регулирования их геометрии в режиме реального времени [2–4, 16–18, 20, 21]. В длинномерных трубчатых элементах из высокомодульных

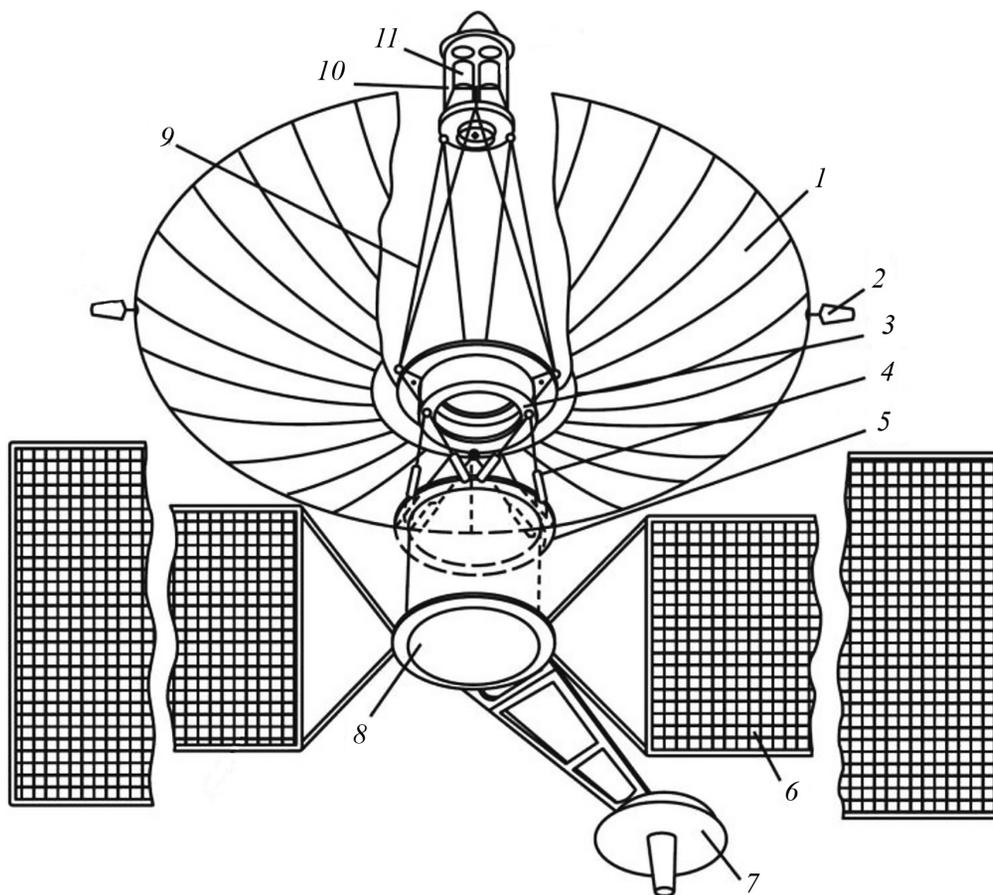


Рис. 6. Общий вид космического радиотелескопа с активной переходной фермой: 1 — прецизионный складной рефлектор антенны; 2 — малонаправленная антенна; 3 — платформа; 4 — активная переходная ферма; 5 — основание; 6 — панель солнечных батарей; 7 — телеметрическая антенна; 8 — несущая конструкция космического аппарата; 9 — опора фокального блока; 10 — фокальный блок; 11 — звездный датчик

Fig. 6. General view of a space radio telescope with an active transfer truss: 1 — precision folding antenna reflector; 2 — unidirectional antenna; 3 — platform; 4 — active transfer truss; 5 — base; 6 — solar panel; 7 — telemetric antenna; 8 — supporting structure of the spacecraft; 9 — focal block support; 10 — focal block; 11 — star sensor

ВПКМ, например, стержнях опоры фокального блока или вторичного зеркала (см. рис. 1, 3, 4), можно организовать предварительные напряжения за счет натяжения кабельного троса внутри опор, что позволит получить одинаковые значения модуля упругости во всем диапазоне нагрузок (см. рис. 5). Однако в этом случае из-за текучести материала длительная нагрузка способна привести к деформации и короблению элементов из высокомодульных ВПКМ, что потребует введения элементов автоматического регулирования их геометрии [3].

Все известные до второй половины 1990-х гг. виброзащитные системы прецизионных КГКК и их наведения в космическом пространстве представляли собой три последовательно соединенных уровня, расположенных между космическим аппаратом и КГКК: несущую, как правило, ферменную конструкцию; средства виброзащиты от внешних и внутренних микродинамических воз-

действий и прецизионное поворотное устройство углового наведения КГКК.

В ИМАШ РАН разработан одноуровневый принцип, основанный на выполнении несущей ферменной конструкции, системы активной виброзащиты и пространственного наведения КГКК в виде пространственного параллельного механизма с 6DoF [2–4, 16–18, 20–22] (рис. 6), подобного платформе Стюарта [9], которая при выключенных линейных приводах становится шестистержневой пространственной ферменной конструкцией.

Новый подход был успешно апробирован ИМАШ РАН на 2-й Европейской конференции по структурному управлению («Second European Conference on Structural Control», Champs-sur-Marne, France, July 3–6, 2000 [23]). Очевидно, что предлагаемый одноуровневый подход выгодно отличается от трехуровневого в связи с меньшими габаритами и массой, что делает его привлекательным

при создании подобных систем. Подобная одноуровневая система позволяет решить следующие проблемы: снизить микродинамическую чувствительность прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ до допустимых значений и обеспечить их высокоточное наведение на исследуемый объект в космических условиях. При этом в ИМАШ РАН показана возможность одноуровневой системы обеспечивать активную виброзащиту и наведение прецизионных КГКК одновременно [19, 22].

Выводы

1. Выявлена проблема возникновения микродинамической чувствительности прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ, связанная со скачкообразным увеличением модуля упругости материала при преодолении пороговых значений малых напряжений.

2. Экспериментально на трубчатых образцах-свидетелях с площадью поперечного сечения $4,52 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, изготовленных из углепластика КМУ-4Л, установлено скачкообразное увеличение модуля упругости при сжатии образцов-свидетелей. При этом средние значения модулей упругости на первом (от 0 до 5 кН) и последующих участках нагружения составили 7,375 и 158 ГПа соответственно.

3. Установлено, что при малых нагружениях в условиях орбитального полета расчетные значения модуля упругости прецизионных КГКК из высокомодульных ВПКМ могут превышать реальные более чем в 20 раз и реальные упругие деформации подобных конструкций могут быть существенно выше расчетных и превышать допустимые значения.

4. Показано, что при наземной отработке прецизионных КГКК вследствие погрешности применяемых систем обезвешивания остаточные нагрузки на их элементы превышают значения указанных малых нагружений. Таким образом, при использовании высокомодульных ВПКМ в прецизионных КГКК, необходимо учитывать их микродинамическую чувствительность к внешним и внутренним микродинамическим воздействиям в орбитальном полете.

5. Представлены возможные пути решения проблемы микродинамической чувствительности для указанного типа космических конструкций.

Список литературы

- [1] Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
- [2] Саяпин С.Н., Артеменко Ю.Н., Мышонкова Н.В. Проблемы прецизионности криогенного космического телескопа обсерватории «МИЛЛИМЕТРОН» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, 2014. № 2 (53). С. 50–76.
- [3] Саяпин С.Н. Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: ИМАШ РАН, 2003. 446 с.
- [4] Саяпин С.Н. Проблема гравитационной чувствительности крупногабаритных прецизионных космических конструкций из высокомодульных ВПКМ // Труды III Межд. конф. «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций», Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 23–25 октября 2018 г. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. С. 116–118.
- [5] Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В. «Радиоастрон» — телескоп размером 300 000 км. Основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрономический журнал, 2011. Т. 90. № 3. С. 179–222.
- [6] Андреев В.В., Кардашев Н.С., Хартов В.В. Наземно-космический радиоинтерферометр «Радиоастрон» // Космические исследования, 2014. Т. 52. № 5. С. 353–359.
- [7] Саяпин С.Н., Шкапов П.М., Кокушкин В.В. Применение эффекта Баушингера при длительном хранении полимерных композиционных конструкций в напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2017. № 2. С. 63–72.
- [8] Саяпин С.Н., Евтов В.Д., Битушан Е.И. Способ изготовления полых изделий из композиционных материалов. Авторское св-во СССР №1666336. МКИ В29С 53/56, В29L 22/00. / Заявлено 27.07.88 г. Опубликовано 30.07.91 г., Бюл. № 28.
- [9] Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proc. Inst. Eng. 1965–66, v. 180, no. 15, pt. 1, pp. 371–386.
- [10] Гунаев Г.М., Сорина Т.Г., Хорошилова И.П., Румянцев А.Ф. Конструкционные эпоксидные углепластики // Авиационная промышленность, 1984. № 12. С. 1–16.
- [11] ГОСТ 28006–88. Лента углеродная конструкционная. Технические условия. Введ. 1990-01-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1989. 14 с.
- [12] Языева С.Б., Андреев В.И., Блягоз А.М. Эффект «ям» коэффициента линейного температурного расширения армированных стеклопластиков // Новые технологии, 2012. № 3. С. 153–156.
- [13] Гайдукова А.О., Белянин Н.А. Обзор систем обезвешивания // Решетневские чтения, 2016. Т. 1. № 20. С. 93–95.
- [14] Рябуха С.Б., Киселев С.В. Исследование вибрационных возмущений на борту орбитального комплекса «Мир» // VII Российский симпозиум. Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем. Москва, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, 11–14 апреля 2000 г. М.: ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2000. С. 102–104.
- [15] Моишеев А.А. Методология обеспечения прецизионности конструкции летательных аппаратов // Сб. тез. докл. XXV академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 24–26 января 2001 г. М.: Война и мир, 2001. С. 56–57.
- [16] Саяпин С.Н., Синев А.В., Трубников А.Г. Способ подавления помех от колебаний упругой конструкции космической трансформируемой антенны в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления: Патент РФ №2161109, В64G1/00, 1/22, 3/00 / заявитель ФГБУН «ИМАШ РАН». Опул. 27.12.2000 г. Бюл. № 36.
- [17] Саяпин С.Н. Перспективы и возможное применение пространственных механизмов параллельной структуры в космической технике // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2001. № 1. С. 17–26.

- [18] Саяпин С.Н., Кокушкин В.В. Способ подавления помех от колебаний упругой конструкции космической трансформируемой антенны в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления: Патент РФ №2323136, В64G1/00, 1/22, 3/00 / заявитель ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Опубл. 27.04.2008 г. Бюл. № 12.
- [19] Preumont A. *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 432 p.
- [20] Sayapin S.N., Artemenko Yu.N. Intelligence System for Active Vibration Isolation and Pointing of Ultrahigh-Precision Large Space Structures in Real Time // *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series «Studies in Systems, Decision and Control», 2016, v. 49, Chapter 10, Part II «Synthesis of Automatic Control Systems» / Ed. A.E. Gorodetskiy. Springer, Cham, Switzerland, 277 p., pp. 103–115.
- [21] Саяпин С.Н. Новые механизмы космической робототехники // *Новые механизмы в современной робототехнике* / под ред. В.А. Глазунова. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. С. 207–231.
- [22] Bronowicki A.-J. Vibration Isolator for Large Space Telescopes // *J. of Spacecraft and Rockets*, 2006, v. 43, no. 1, pp. 45–53.
- [23] Sayapin S.N. Active vibration isolation and pointing system for high-precision large deployable space antennas (HLDSA) // *Abstracts of Second European Conference on Structural Control*. ENPC, Champs-sur-Marne, France, July 3–6, 2000, p. 231.

Сведения об авторе

Саяпин Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, гл. науч. сотр. ФГБУН «ИМАШ РАН», S.Sayapin@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

MICRODYNAMICAL SENSITIVITY OF PRECISION LARGE-SIZE SPACE STRUCTURES FROM HIGH-MODULUS FIBROUS POLYMERCOMPOSITE MATERIALS

S.N. Sayapin^{1,2}

¹The Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, 4, Maly Khariton'evskiy per., 101000, Moscow, Russia

²BMSTU, 1, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

S.Sayapin@rambler.ru

The causes of microgravity problem and inertial sensitivity of precision large-size space structures from high-modulus fibrous polymer composite materials associated with an abrupt increase in the elastic modulus of the material when overcoming the threshold values of low stresses are considered. For example, the elastic modulus of tubular samples from high-modulus fibrous polymer composite materials with the longitudinal carbon fibers at the first (from 0 to 5 kN) and subsequent loading sites were 7,375 GPa and 158 GPa, respectively. As a result, under low loads arising in orbital flight, the calculated values of the elastic modulus of precision large-size space structures can be higher than the real ones by more than 20 times and the real elastic deformation in such structures can be higher than the calculated ones. Thus, when using high-modulus fibrous polymer composite materials in precision large-size space structures it is necessary to take into account their microgravity and inertial sensitivity in orbital flight. Possible ways of solving the problem are shown.

Keywords: microdynamics sensitivity, precision large-size space structures, high-modulus fibrous polymer composite materials, antygravity systems

Suggested citation: Sayapin S.N. *Problema mikrodinamicheskoy chuvstvitel'nosti pretsizionnykh krupnogabaritnykh kosmicheskikh konstruksiy iz vysokomodul'nykh voloknistykh polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Microdynamical sensitivity of precision large-size space structures from high-modulus fibrous polymercomposite materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 23–31.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-23-31

References

- [1] Mikhaylin Yu.A. *Voloknistye polimernye kompozitsionnye materialy v tekhnike* [Fibrous polymeric composite materials in engineering]. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013, 720 p.
- [2] Sayapin S.N., Artemenko Yu.N., Myshonkova N.V. *Problemy pretsizionnosti kriogenogo kosmicheskogo teleskopa observatorii «MILLIMETRON»* [Problems of precision of the cryogenic space telescope of the OBSERVATORY «MILLIMETRON»]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki* [BMSTU Bulletin. Ser. of natural Sciences], 2014, no. 2 (53), pp. 50–76.
- [3] Sayapin S.N. *Analiz i sintez raskryvaemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruksiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa* [Analysis and synthesis of precision large-size mechanisms and structures of petal-type space radio telescopes revealed in orbit]. *Diss. ... Dr. Sci (Tekh.)*. М.: IMASH RAN, 2003, 446 p.

- [4] Sayapin, S.N. *Problema gravitatsionnoy chuvstvitel'nosti krupnogabaritnykh pretsizionnykh kosmicheskikh konstruktсий i vysokomodul'nykh VPKM* [The problem of gravitational sensitivity of large-sized precision space structures made of high-modulus FPCM]. Trudy Tret'ey mezhduнародnoy konferentsii «Deformirovaniye i razrusheniye kompozitsionnykh materialov i konstruktсий» [Proceedings of the Third international conference «Deformation and destruction of composite materials and structures»]. Moscow — Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2018, pp. 116–118.
- [5] Kardashev N.S., Khartov V.V., Abramov V.V. i dr. «Radioastron» — teleskop razmerom 300000 km. Osnovnyye parametry i pervyye rezul'taty nablyudeniy [«Radioastron» — a telescope with a size of 300000 km. Main parameters and first observational results]. *Astronomicheskii zhurnal* [Astronomical journal], 2011, vol. 90, no. 3, pp. 179–222.
- [6] Andreyanov V.V., Kardashev N.S., Khartov V.V. *Nazemno-kosmicheskii radiointerferometr «Radioastron»* [Ground-space radio interferometer «Radioastron»]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 2014, vol. 52, no. 5, pp. 353–359.
- [7] Sayapin S.N., Shkapov P.M., Kokushkin V.V. *Primeneniye effekta Baushingera pri dlitel'nom khraneniі polimernykh kompozitsionnykh konstruktсий v napryazhenном sostoyanii* [Application of the Baushinger' effect in long-term storage of polymer composite structures in a stressed state]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation], 2017, no. 2, pp. 63–72.
- [8] Sayapin S.N., Evtov V.D., Bitushan E.I. i dr. *Sposob izgotovleniya polykh izdeliy iz kompozitsionnykh materialov* [Method of manufacturing hollow products from composite materials]. Copyright St. USSR in the number 1666336. MKI B29C 53/56, B29L 22/00, declared 27.07.88, published 30/07/91, bull. no. 28.
- [9] Stewart D. A platform with six degrees of freedom // *Proc. Inst. Eng.* 1965–1966, v. 180, no. 15, pt. 1, pp. 371–386.
- [10] Gunyaev G.M., Sorina T.G., Khoroshilova I.P., Rumyantsev A.F. *Konstruktсионnye epoksidnye ugleplastiki* [Structural epoxy carbon plastics]. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation industry], 1984, no. 12, pp. 1–16.
- [11] *GOST 28006–1988. Lenta uglerodnaya konstruktсионnaya. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 28006–1988. Carbon structural tape. Technical conditions. Enter 1990-01-01]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam: Izd-vo standartov [State Committee of the USSR on standards: Standards Publishing House], 1989, 14 p.
- [12] Yazyeva S.B., Andreev V.I., Blyagoz A.M. *Effekt «yamy» koeffitsienta lineynogo temperaturnogo rasshireniya armirovannykh stekloplastikov* [The effect of «pit» coefficient of linear temperature expansion of reinforced fiberglass]. *Novyye tekhnologii* [New technologies], 2012, no. 3, pp. 153–156.
- [13] Gaydukova A.O., Belyanin N.A. *Obzor sistem obezveshivaniya* [Review of antigravity systems]. *Reshetnevskie chteniya* [Resetdevice reading], 2016, v. 1, no. 20, pp. 93–95.
- [14] Ryabukha S.B., Kiselev S.V. *Issledovaniye vibratsionnykh vozmushcheniy na bortu orbital'nogo kompleksa «Mir»* [Investigation of vibration disturbances on Board the «Mir» orbital complex]. VII Rossiyskiy simpozium. *Mekhanika nevesomosti. Itogi i perspektivy fundamental'nykh issledovaniy gravitatsionno-chuvstvitel'nykh sistem* [Proceedings of the 7th Russian Symposium «Mechanics of weightlessness. Results and prospects of fundamental research of gravity-sensitive systems»], Moscow, IPMech RAS, April 11–14, 2000. Moscow: IPMech RAS, 2000, pp. 102–104.
- [15] Moisheev A.A. *Metodologiya obespecheniya pretsizionnosti konstruktсий letatel'nykh apparatov* [Methodology for ensuring the precision of aircraft design]. *Sbornik tezisov dokladov XXV akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Collection of abstracts of the XXV academic readings on cosmonautics devoted to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, January 24–26, 2001. Moscow: Voina i mir, 2001, pp. 56–57.
- [16] Sayapin S.N., Sinev A.V., Trubnikov A.G. *Sposob podavleniya pomekh ot kolebaniy uprugoy konstruktсії kosmicheskoy transformiruemy anteny v protsesse ekspluatatsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for suppressing interference from vibrations of the elastic structure of the space transformable antenna during operation and a device for its implementation]. Pat. Russian Federation, no. 2161109, B64G1/00, 1/22, 3/00, applicant «IMASH RAN» Publ. 27/12/2000, bull. no. 36.
- [17] Sayapin S.N. *Perspektivy i vozmozhnoye primeneniye prostranstvennykh mekhanizmov parallel'noy struktury v kosmicheskoy tekhnike* [Prospects and possible application of spatial mechanisms of parallel structure in space engineering]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and reliability of machines], 2001, no. 1, pp. 17–26.
- [18] Sayapin S.N., Kokushkin V.V. *Sposob podavleniya pomekh ot kolebaniy uprugoy konstruktсії kosmicheskoy transformiruemy anteny v protsesse ekspluatatsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for suppressing interference from vibrations of the elastic structure of the space transformable antenna during operation and a device for its implementation]. Pat. Russian Federation, no. 2323136, B64G1/00, 1/22, 3/00, applicant S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «ENERGIA» Publ. 27/04/2008, bull. no. 12.
- [19] Preumont A. *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 432 p.
- [20] Sayapin S.N., Artemenko Yu.N. *Intelligence System for Active Vibration Isolation and Pointing of Ultrahigh-Precision Large Space Structures in Real Time // Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Series «Studies in Systems, Decision and Control»*, 2016, vol. 49, Chapter 10, Part II «Synthesis of Automatic Control Systems»/ Ed. A.E. Gorodetskiy. Springer, Cham, Switzerland, 277 p., pp. 103–115.
- [21] Sayapin S.N. *Novyye mekhanizmy kosmicheskoy robototekhniki* [New mechanisms of space robotics]. *Novyye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Ed. V.A. Glazunov. Moscow: TECHNOSPHERA, 2018, pp. 207–231.
- [22] Bronowicki A.-J. *Vibration Isolator for Large Space Telescopes*. *J. of Spacecraft and Rockets*, 2006, vol. 43, no. 1, pp. 45–53.
- [23] Sayapin S.N. *Active vibration isolation and pointing system for high-precision large deployable space antennas (HLDSA)*. Abstracts of Second European Conference on Structural Control. ENPC, Champs-sur-Marne, France, July 3–6, 2000, p. 231.

Author's information

Sayapin Sergey Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU, Chief Research Worker of Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, S.Sayapin@rambler.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.