

УДК 004.05

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АДАПТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Ю. Н. Артеменко,

канд. техн. наук, заведующий отделом

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

А. Е. Городецкий,

доктор техн. наук, профессор

В. В. Дубаренко,

доктор техн. наук, профессор

А. Ю. Кучмин,

канд. техн. наук

И. Л. Тарасова,

канд. техн. наук, доцент

Институт проблем машиноведения РАН

Рассматриваются основные проблемы управления радиотелескопом и его адаптации в условиях космоса. Изложены общие принципы управления зеркальной системой космического телескопа «Миллиметрон». Рассмотрены варианты конструкций механики подсистем адаптации. Проанализированы свойства и характеристики различных материалов при низких температурах. Приведены оценки динамических характеристик конструкций элементов зеркальной системы.

Ключевые слова — космический радиотелескоп, система автоматического управления, криогенные температуры, электроприводы.

Введение

Космические телескопы, в частности телескоп обсерватории «Миллиметрон» диаметром 12 м, предназначены для исследования различных объектов Вселенной в миллиметровом и инфракрасном диапазонах (от 20 мкм до 20 мм) как с ультравысокой чувствительностью (режим одиночного телескопа), так и со сверхвысоким угловым разрешением (в режиме интерферометра).

Высокая чувствительность таких телескопов достигается за счет теплового экранирования антенны и глубокого охлаждения телескопа и приемной аппаратуры с помощью криогенной установки. Высокое угловое разрешение может обеспечиваться за счет использования адаптивного управления элементами зеркальной системы телескопа при работе в режиме интерферометра, состоящего из космического телескопа и крупнейших наземных телескопов.

Главное зеркало (ГЗ), а также контррефлектор (КР) таких телескопов могут состоять из подвижных щитов, устанавливаемых на актуаторах,

обеспечивающих адаптацию их поверхностей с помощью соответствующих управляющих систем, создание которых требует решение целого ряда проблем, связанных с эксплуатацией отдельных ее элементов в условиях сверхнизких температур и глубокого вакуума.

Обобщенная структура систем управления зеркальной системой радиотелескопа в условиях космоса

В отношении принципов управления зеркальной системой рассматриваемых радиотелескопов можно с большой долей уверенности сказать, что они будут аналогичны отработанным принципам управления зеркальной системой радиотелескопа РТ-70, строящегося в международной обсерватории «Суффа» в Узбекистане [1].

Система управления космического радиотелескопа (КРТ) в самом общем случае может состоять из 5 основных контуров.

1. Контур управления формой поверхности ГЗ. Положение щитов лепестков ГЗ меняется при

помощи электромеханических актуаторов так, чтобы обеспечить минимальное среднеквадратическое отклонение профиля поверхности от рассчитанного аппроксимирующего параболоида (АП) ГЗ.

2. Контур управления положением ГЗ. Наведение ГЗ осуществляется по углу азимута и углу места так, чтобы фокальная ось АП, построенного по методу наименьших квадратов по измерениям реперных точек поверхности ГЗ, совместились с линией визирования космического источника радиоизлучения.

3. Контур управления положением КР. Положение КР изменяется так, чтобы фокус и фокальная ось АП ГЗ и фокус и фокальная ось аппроксимирующего эллипсоида (АЭ) КР совместились с минимальными ошибками.

4. Контур управления формой поверхности КР. Положение щитов КР меняется при помощи электромеханических актуаторов так, чтобы обеспечить минимальное среднеквадратическое отклонение между ходами лучей от всех точек поверхности ГЗ до перископического зеркала (ПЗ), рассчитываемых с учетом положения щитов ГЗ и КР.

5. Контур управления положением ПЗ. Из памяти выбирается приемник излучения, с которым предполагается работа, и определяется управляющее воздействие, подаваемое на электропривод ПЗ. Затем по данным о координатах космического источника радиоизлучения и взаимном положении элементов зеркальной системы с помощью электродинамической модели последней рассчитываются координаты фазового центра электромагнитного излучения в зоне ПЗ и определяются управляющие воздействия для электроприводов ПЗ, чтобы системы координат приемника и фазового центра совместились.

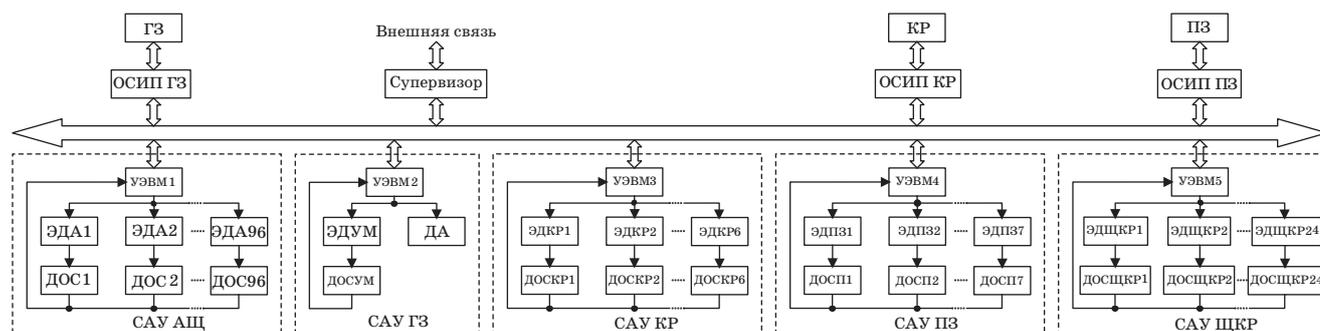
Управление указанными контурами и их синхронизацию осуществляет центральный компьютер или супервизор. Он же будет координировать свою деятельность с другими подсистемами космического аппарата и с наземными службами.

Система адаптации КРТ обычно строится в виде управляющей локальной вычислительной сети (УЛВС), объединяющей УЭВМ1—УЭВМ5 контуров автоматического управления с контролерами оптических систем измерения положения ГЗ, КР и ПЗ под управлением сетевого сервера (супервизора). Данная УЛВС должна обеспечивать в реальном времени обмен информацией между подсистемами, находящимися в различных температурных режимах от 4 до 300 К в условиях глубокого вакуума, и подачу им питающих напряжений.

На обобщенной структуре УЛВС (рис. 1) обозначены: ОСИП — оптическая система измерения положения; САУ — системы автоматического управления актуаторами щитов; АЩ — актуаторы щитов ГЗ; ЩКР — щиты контррефлектора; ЭДА1—ЭДА96 — электродвигатели актуаторов; ДОС1—ДОС96 — датчики обратной связи перемещения актуаторов; ЭДУМ — электродвигатель угла места; ДОСУМ — датчик обратной связи угла места; ДА — двигатели азимута; ЭДКР1—ЭДКР6 — электродвигатели системы перемещения контррефлектора; ДОСКР1—ДОСКР6 — датчик обратной связи перемещения контррефлектора; ЭДПЗ1—ЭДПЗ7 — электродвигатели системы перемещения плоского зеркала; ДОСПЗ1—ДОСПЗ7 — датчики обратной связи перемещения плоского зеркала; ЭДЩКР1—ЭДЩКР24 — электродвигатели системы щитов КР; ДОСЩКР1—ДОСЩКР24 — датчики обратной связи системы щитов КР.

Системы управления положением и формой поверхности ГЗ и КР охлаждаемого КРТ представляют собой наиболее сложную проблему, связанную, прежде всего, с необходимостью решения следующих задач:

- создание принципиально новой измерительной системы, обеспечивающей точное (с погрешностью не более 10 мкм) измерение положения щитов зеркал при температуре 4 К;
- исследование динамики поведения элементов конструкции ГЗ и КР при их раскрытии и охлаждении до 4 К;



■ Рис. 1. Обобщенная структура УЛВС

- выбор либо разработка наиболее эффективных двигателей для актуаторов щитов;
- исследование динамики поведения конструкции ГЗ при повороте по углу места и азимуту;
- выбор либо разработка наиболее эффективных двигателей для угловых и линейных перемещений зеркал;
- исследование трения и смазки подвижных узлов конструкции зеркал при температуре 4 К;
- выбор движителей электроприводов, работающих в космосе при температуре 4 К, и расчет их силовых и тепловых характеристик.

Варианты конструкций механики подсистем адаптации

Первый вариант коррекции ошибок наведения и деформаций зеркальной системы — это применение деформируемых зеркал, использующихся в оптических телескопах. Они состоят из отдельных сегментов, каждый из которых управляется тремя пьезоэлектрическими актуаторами (толкателями). Этот тип зеркал использован в системе адаптивной оптики телескопа Джемини [2]. Подобные конструкции могут применяться в системах управления щитами поверхностей ГЗ и КР при условии адаптации пьезодвигателей к условиям сверхнизких температур и глубокого вакуума.

Второй вариант — это возможность использовать гексаподы из комбинированных приводов, взяв за аналог такого устройства гексаподы производства фирмы PI (Германия) [3], с наконечниками на пьезоприводах, например типа NEX-LINE (рис. 2). В основу такого метода позиционирования подвижного основания гексапода положен следующий принцип: электромеханический привод совершает наибольшее перемещение под-



■ Рис. 2. Общий вид гексапода, построенного на комбинированном приводе

вижного основания, а за счет пьезопривода на конце каждого электропривода осуществляется точная подстройка.

Конструкцию привода системы автоматического управления положением ПЗ целесообразно строить по аналогии с КР. Однако основание гексапода (ПЗ) должно иметь возможность поворачиваться от электропривода углового перемещения, обеспечивающего перенаправление излучения на тот или иной приемник.

Конструкцию привода наведения ГЗ можно выполнить по аналогии с электроприводом углового перемещения ПЗ. При этом угломестный электропривод связывается с жесткой частью ГЗ.

При создании конструкций электроприводов рассматриваемых систем прежде всего необходимо подобрать конструкционные материалы, обеспечивающие работоспособность и долговечность систем в условиях эксплуатации при сверхнизких температурах.

Анализ свойств и характеристик различных материалов при низких температурах

С понижением температуры большинство материалов становятся более прочными и износостойкими. При 77 К (температура кипения жидкого азота) предел прочности большинства металлов в 2–5 раз больше, чем при комнатной температуре; прочность некоторых пластмасс увеличивается в 8 раз, стекла — в 12 раз. При 4,2 К (температура кипения жидкого гелия) предел прочности меди в 2 раза больше, чем при комнатной температуре, а прессованного алюминия — в 6 раз, сталей — в 2,5–3 раза [4].

Однако при низких температурах в материале, особенно под нагрузкой, могут происходить внутренние структурные превращения, в результате которых возрастает опасность внезапного разрушения деталей. Поэтому даже в тех случаях, когда глубокое охлаждение носило временный характер, при последующей работе в условиях нормальных температур следует считаться с возможными остаточными явлениями, а при работе в условиях низких температур необходимо учитывать возможность преждевременного хрупкого разрушения материала в результате уменьшения пластичности.

В последнее время в конструкциях аппаратов космического назначения все шире применяют различные углепластики, и в частности углеродное волокно (УВ), которое получают высокотемпературной обработкой в среде инертного газа синтетических волокон из полиакрилонитрила или других полимеров. Поэтому УВ эластичное, имеет развитую поверхность и в силу произошед-

шей графитизации (карбонизации) приобретает кроме прочности еще и свойства повышенной тепло- и электропроводности, износостойкости и антифрикционности. Естественно, что такой набор ценных характеристик существенно расширяет спектр технологических и эксплуатационных свойств углепластиков, которые в настоящее время являются наиболее перспективными материалами для аэрокосмической отрасли.

В РКК «Энергия» им. С. П. Королева разработана технология изготовления отражающей поверхности из УВ для крупногабаритных развертываемых рефлекторов космических телескопов [5]. Основным требованием, предъявляемым к отражающей поверхности больших развертываемых рефлекторов, является обеспечение точности положения опорных точек отражающей поверхности и их принадлежность к теоретической поверхности. Техническим результатом разработанной технологии является возможность изготовления рефлекторов диаметром от 6 до 18 и более метров. Однако данных об испытании образцов изделий, выполненных по данной технологии, при сверхнизких температурах до 4 К не имеется.

Европейским космическим агентством (ESTEC) совместно с НПО им. С. А. Лавочкина и АКЦ ФИАН им. П. Н. Лебедева разработаны прецизионные трубы каркаса и размеростабильные параболические оболочки радиотелескопа диаметром 10 м [6, 7]. Прецизионные трубы сохраняют форму и размеры в интервале температур эксплуатации для каркасов антенн КРТ и для крепления приборных платформ к корпусам спутников и имеют следующие параметры: длина до 1300 мм; модуль упругости не менее 108 ГПа; коэффициент линейного термического расширения не более $0,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; термическая крутка не более 7"; термический изгиб не более 10 мкм.

Размеростабильные параболические оболочки и сегменты оболочек представляют собой трехслойные конструкции из сотового заполнителя и обшивок из эпоксидного углепластика с радиоотражающим металлизированным слоем на основе синтетической ткани, нанесенным на рабочие поверхности, и имеют следующие параметры: предельное отклонение параболической поверхности от теоретической не более 0,4 мм; коэффициент линейного термического расширения обшивок не более $0,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; диаметр оболочек до 2800 мм; размеры сегментов до 2800 × 7800 мм; толщина конструкций от 5 до 50 мм; масса от 2,5 кг на 1 м² конструкции.

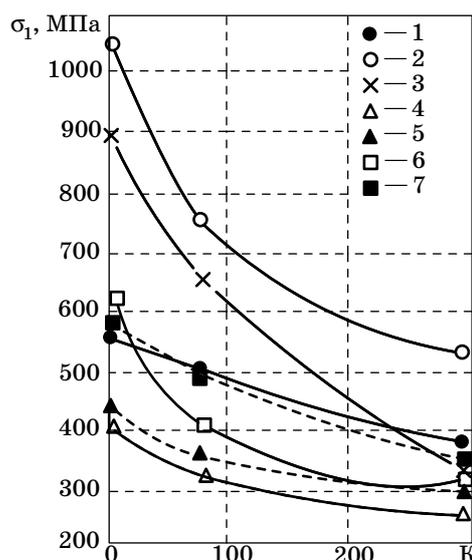
Поведение материалов и особенности их разрушения при низких температурах имеют определяющее значение для успешного создания космической техники, работающей значительное время при низких (до 4 К) температурах.

Исследования, проводимые в этой области [6], показывают, что относительный температурный коэффициент линейного расширения стремится к нулю при температурах, близких к абсолютному нулю. Общее термическое линейное расширение у металлов при нагреве от гелиевых температур до 293 К обычно меньше 0,5 % первоначальной длины образца (у меди 0,3 %). Медь, алюминий, серебро, β-никель, свинец, золото, платина и некоторые из их сплавов сохраняют значительную пластичность при весьма низких температурах (до 4 К).

Металлы с кристаллической решеткой объемно-центрированного куба: α-железо, хром, молибден, тантал и вольфрам — склонны к разрушению без остаточных пластических деформаций. Температура перехода этих материалов в хрупкое состояние изменяется в широких пределах — от нескольких сотен градусов для вольфрама до гелиевых температур для тантала.

Прочность материалов при многократных нагружениях характеризуется пределом усталости. Его изменения у некоторых металлов при их охлаждении показаны на рис. 3. Хотя предел усталости многих металлов при снижении температуры возрастает, увеличивается при этом опасность перехода от усталостного к хрупкому разрушению при возникновении первых небольших трещин.

При выборе конструкционных материалов для электроприводов важное значение имеет анализ изменения их электрического сопротивления при

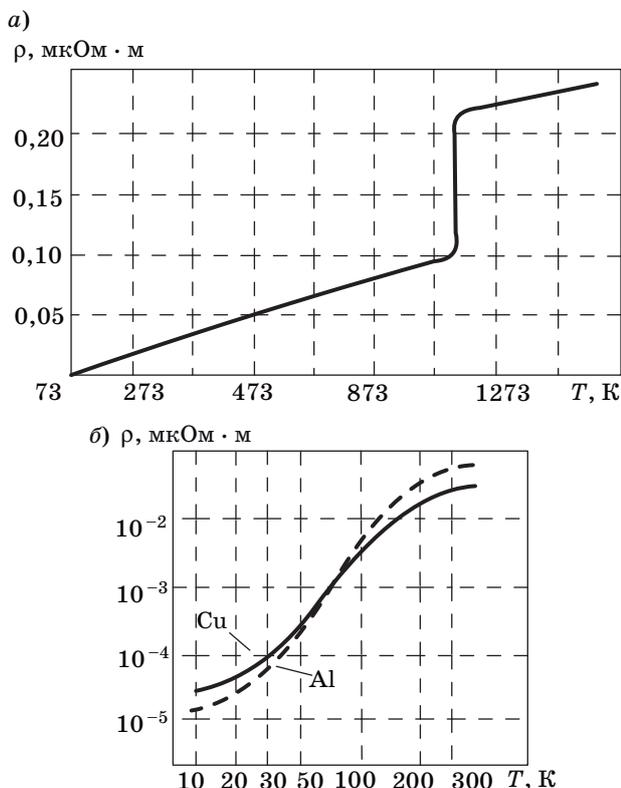


■ Рис. 3. Зависимость предела усталости σ_1 от температуры [4]: 1 — сталь 12×18Н10Т; 2 — сталь 7×16Н6; 3 — сталь 03×20Н16АГ6; 4 — алюминиевый сплав АМг6; 5 — алюминиевый сплав Д20; 6 — титановый сплав АТ2; 7 — титановый сплав ВТ-5

понижении температуры. Когда температура снижается, термоактивируемые эффекты в кристаллических телах уменьшаются; значительно изменяются основные физические и механические свойства. Электросопротивление металлов линейно уменьшается с понижением температуры и устанавливается на значении, обычно называемом остаточным сопротивлением (рис. 4). У ряда металлов при температурах от 4 до 23 К электрическое сопротивление падает почти до нуля [7]. На прочность и вид разрушения твердых тел переход в сверхпроводящее состояние не влияет.

Сверхпроводимость наблюдается при охлаждении материалов (в основном металлов) ниже определенной критической температуры. При этом электрическое сопротивление постоянному току обращается практически в нуль и магнитное поле выталкивается из объема образца (эффект Мейснера).

Сверхпроводимость наблюдается как у элементов, так и у сплавов и металлических соединений. Сверхпроводимость есть у Hg, Sn (белое), Pb, Tl, Tn, Ga, Ta, Th, Ti, Nb (иногда Cd). Наибольшее распространение из сверхпроводящих материалов в электротехнике получили сплав ниобий-титан и интерметаллид ниобий-олово.



■ Рис. 4. Зависимости удельного сопротивления от температуры в широком интервале температур для меди (а) и при низких температурах для меди и алюминия (б) [8]

Технологические процессы изготовления и стабилизации исключительно тонких ниобий-титановых нитей достигли весьма высокого уровня развития. При создании многожильных проводников на основе ниобий-олова часто применяется так называемая бронзовая технология. Наиболее широкое реальное использование сверхпроводимости находит при создании крупных электромагнитных систем, так как при сверхнизких температурах можно получать значительные величины индукции.

Использование сверхпроводников для получения сверхсильных постоянных магнитов является одним из важнейших достижений физики низких температур [9]. Сверхпроводящий соленоид, в отличие от обычного, не нуждается во внешнем источнике питания, поскольку однажды возбужденный в нем ток не затухает. Нужно только поддерживать соленоид при низкой температуре, а для этого требуются гораздо меньшие мощности, так как с понижением температуры удельное сопротивление ферромагнитного материала резко падает.

Для устройства различных электромеханических преобразователей широко применяется пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный). Для этого иногда используют составные пьезоэлементы, предназначенные для осуществления деформаций разного типа. Для аэрокосмической техники в основном используется пьезокерамика.

Низкотемпературная пьезокерамика представлена материалами на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца марок ЦТ-19, ЦТБС-3, ЦТС-23, ЦТС-35, ЦТСНВ-1 и др. [10].

Характеристики различных пьезокерамик при сверхнизких температурах (до 4 К) изучены слабо, и открытых публикаций по ним практически нет.

Расчет динамических характеристик конструкций

Предполагается, что основой конструкций элементов зеркальной системы космического телескопа будут прецизионные углепластиковые трубы, разработанные ТСТЕС совместно с НПО им. С. А. Лавочкина и АКЦ ФИАН им. П. Н. Лебедева.

Оценим возможные собственные колебания наиболее проблемных элементов конструкции по следующим исходным данным [11]:

масса главного зеркала (m)	1500 кг
количество лепестков (n)	24
масса жесткого зеркала (m_g)	~ 800 кг
масса раскрывающегося зеркала (m_w)	~ 700 кг
масса одного сегмента (m_s)	~ 30–60 кг
масса контррефлектора (m_k)	~ 400–600 кг

модуль упругости (e) ~ 108 ГПа
 диаметры поперечного сечения
 труб (d) ~ 25–100 мм

Тогда площади поперечного сечения труб $S = 0,25\pi d^2$ будут в пределах $4,9 \times 10^{-4} \div 7,9 \times 10^{-3}$ мм², и их жесткость ($C = eS$) соответственно $5,3 \times 10^7 \div 8,5 \times 10^8$ Н/м.

Частота собственных колебаний лепестков рассчитывается по формуле

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}} \text{ [Гц].}$$

Результаты расчета собственных колебаний лепестков показаны в табл. 1, а контррефлектора — в табл. 2.

Поскольку установка контррефлектора предполагается на 8 трубах, при расчете собственных колебаний будем считать, что его жесткость $C_k = 8C$.

При расчете собственных колебаний зеркальной системы в целом будем полагать, что ее жесткость $C_{з.с} = 16C$. Тогда собственная частота

$$F_{з.с} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{з.с}}{m}} = 508 \text{ Гц.}$$

Элементы зеркальной системы телескопа при оценке их колебаний будем описывать дифференциальным уравнением вида

$$m\ddot{x} = -Cx - r\dot{x} + f,$$

где m — масса элемента; C — его жесткость; x — перемещение; r — коэффициент сопротивления; f — возмущающая сила.

Используя преобразование Лапласа, можно получить передаточную функцию такого звена в виде

■ **Таблица 1.** Ожидаемые частоты собственных колебаний лепестков

m_s , кг	d , мм			
	25	50	75	100
30	212	423	635	846
35	196	392	588	784
40	183	366	550	733
45	173	345	518	691
50	164	328	492	656
55	156	313	469	625
60	150	299	449	598

■ **Таблица 2.** Ожидаемые частоты собственных колебаний контррефлектора

m_s , кг	d , мм			
	25	50	75	100
400	159	322	493	656
500	146	291	441	587
600	134	263	403	536

$$W = \frac{1}{C(T^2 s^2 + 2\lambda T s + 1)},$$

где $T = 1/2\pi F$; λ — логарифмический декремент затухания, который в рассматриваемом случае, исходя из свойств материалов при температуре 4 К, по-видимому, будет в пределах от 0,01 до 0,05.

Анализ колебаний элементов конструкций показывает, что амплитуды колебаний могут достигать 100 % от установившихся значений смещений, вызываемых действием возмущающих сил. Однако абсолютные значения амплитуд не превышают 0,04 мкм при силе 1 Н. Время затухания до ± 10 % может достигать 0,4 с.

При маневрах спутника, например переходе с орбиты на орбиту, с ускорениями до 0,1g на элементы крепления телескопа могут действовать возмущающие силы до 150 Н при массе 1500 кг. Тогда амплитуды смещений могут быть до 6 мкм, что опасно с точки зрения образования трещин и возможных разрушений. Поэтому требуется дальнейшее изучение данной задачи с учетом изменения температуры вдоль элемента конструкции и возможных фазовых превращений.

Заключение

1. С большой долей уверенности можно сказать, что принципы управления зеркальной системой космического телескопа «Миллиметрон» будут аналогичны отработанным принципам управления зеркальной системой радиотелескопа РТ-70, строящегося в международной обсерватории «Суффа».

2. Вся вычислительная и усилительная техника может использоваться стандартная, так как она будет расположена в служебном модуле, т. е. будет работать при температуре 300 К. Однако двигатели и сами датчики обратной связи должны быть адаптированы к работе при температуре 4 К, что потребует их специального исполнения и проведения дополнительных исследований.

3. При создании систем автоматического управления космическим телескопом «Миллиметрон» потребуются:

а) отработка принципиально новой измерительной системы, обеспечивающей точное (с погрешностью не более 10 мкм) измерение положения щитов и центрального жесткого зеркала при температуре 4 К;

б) исследование динамики поведения элементов конструкции телескопа при его раскрытии и охлаждении до 4 К;

в) выбор либо разработка наиболее эффективных двигателей для систем управления;

г) исследование динамики поведения конструкции главного зеркала при его повороте по углу места и азимуту;

д) исследование трения и смазки подвижных узлов конструкции телескопа при температуре 4 К;

е) расчет силовых и тепловых характеристик электроприводов, работающих в космосе при температуре 4 К.

4. Анализ свойств и характеристик различных материалов при низких температурах (до 4 К) показал, что:

а) их жесткость резко возрастает, а вязкость падает, что хорошо с точки зрения управления, но одновременно возрастает хрупкость, что плохо;

б) появляется сверхпроводимость, что позволяет уменьшить потребляемую электроприводами мощность и тепловые потери.

5. Анализ существующих принципов преобразования электрической энергии в механическую энергию перемещений показал, что наиболее перспективно использование пьезоэффекта, закона Ампера с использованием вращающегося магнитного поля и конденсаторного эффекта, т. е. эффекта втягивания диэлектрика в конденсаторе. При этом уже существуют пьезодвигатели, работающие на пьезоэффекте при температуре до 6 К.

6. Варианты конструкций механики подсистем адаптации к настоящему времени практиче-

ски не проработаны, так как не определена окончательно концепция построения конструкции телескопа в целом. Однако можно с большой долей уверенности сказать, что в основе механики приводов контррефлектора и плоского зеркала будет использование механизмов типа «гексапод».

7. Проведенные прикидочные расчеты показали, что:

а) с точки зрения силовых характеристик практически во всех электроприводах могут быть использованы пьезодвигатели;

б) все работающие электродвигатели практически не будут сказываться на температуре телескопа;

в) наиболее слабыми звеньями конструкции телескопа с точки зрения механических характеристик являются узлы крепления телескопа к служебному модулю, а также лепестки главного рефлектора и узлы их крепления к жесткому зеркалу и контррефлектор. Их динамические параметры при 4 К могут быть в следующих пределах: собственные частоты колебаний — $130 \div 850$ Гц; время затухания колебаний — $0,01 \div 0,4$ с; максимальные амплитуды колебаний: в обычных режимах — $0,002 \div 0,02$ мкм, при маневрах спутника — $1 \div 6$ мкм.

Литература

1. **Артеменко Ю. Н.** и др. Проблемы обработки и передачи информации в локальной вычислительной сети системы управления радиотелескопа // Информационно-управляющие системы. 2009. № 4. С. 2–8.
2. **Лисов И.** Космический телескоп имени Джеймса Вебба // Новости космонавтики. 2002. № 11. <http://www.novosti-kosmonavтики.ru/content/numbers/238/17.shtml> (дата обращения: 20.01.10).
3. **Официальный сайт** компании PI. <http://www.physikinstrumente.com> (дата обращения: 20.01.10).
4. **Клименко А. П.** и др. Холод в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1977. — 192 с.
5. **Официальный сайт** РКК «Энергия». <http://www.energiya.ru> (дата обращения: 20.01.10).
6. **Официальный сайт** ФГУП «ОНИИП «Технология». <http://www.technologya.ru> (дата обращения: 20.01.10).
7. **Официальный сайт** НПО им. С. А. Лавочкина (ФГУП). <http://www.laspace.ru/rus/millimetron.php> (дата обращения: 20.01.10).
8. **Проводниковые материалы:** электронный учебник / МЭИ (ТУ). <http://ftemk.mpei.ac.ru/ELTM/conductors.htm> (дата обращения: 20.01.10).
9. **Боронин В. Н., Коровкин Н. В., Кузнецов И. Ф.** Теоретические основы электротехники: Электромагнитные характеристики сверхпроводников: учеб. пособие / СПбГПУ. — СПб., 2003. — 108 с.
10. **Sanguinetti B, Varcoe B. T. H.** Use of a piezoelectric SGUGGLE motor for positioning at 6 K in a cryostat // Cryogenics. 2006. Vol. 46. Iss. 6. P. 694–696.
11. **Официальный сайт** Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. Проект «Миллиметрон». <http://www.radioastron.ru/index.php?dep=20> (дата обращения: 20.01.10).