

С. А. Кабанов, д-р техн. наук, проф., kaba-sa@mail.ru,
Б. А. Зимин, канд. физ.-мат. наук, доц., bazimin@mail.ru,
Ф. В. Митин, аспирант, fedor28@list.ru,

Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Разработка и исследование математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть II^{1, 2}

Рассмотрен процесс настройки радиоотражающего сетеполотна крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования. Рефлектор состоит из фронтальной сети, которая натянута на силовой каркас, вант, с помощью которых происходит оттяжка фронтальной сети к тыльной сети для задания необходимой формы отражающей поверхности. Решена задача настройки и определения формы радиоотражающего сетеполотна как в одной плоскости, так и в трех плоскостях. В общем виде задача настройки формы радиоотражающего сетеполотна решается за счет воздействия на конструкцию актюаторов — исполнительного устройства системы управления. Для корректного функционирования рефлектора на орбите требуется возможность управления формой отражающей поверхности путем натяжения фронтальной сети. Для образования и поддержания формы рефлектора фронтальная и тыловые сети соединены вантовыми подкреплениями (оттяжками). Ванты соединяют противоположные узлы сетей. Вантовая система является основой для построения системы поднастройки. Миниатюрные мехатронные модули могут быть расположены на каждой из подстраиваемых вант. Для регулировки формы в одной плоскости применена методика гибких нитей. Показана возможность изменения поверхности одновременным воздействием одного или нескольких актюаторов. Для настройки формы в пространстве применен метод мембраны, описываемый уравнением Лапласа. В качестве актюаторов для задания формы рассмотрены пьезопровод, двигатель постоянного тока и сервомотор. За математическую модель пьезоактюатора принята модель А. А. Никольского. Система решается с учетом жесткого закрепления ответной части рефлектора. Проведено сравнение применения ПИД регулятора и оптимального регулятора. Из принципа максимума выявлена структура оптимального управления. Возникающая двухточечная краевая задача решается методами наискорейшего спуска и Ньютона. Показано, что применение оптимального управления позволяет сократить время переходного процесса. Аналогичная задача была решена для двигателя постоянного тока и сервомотора. Для всех актюаторов показано преимущество использования методов оптимального управления. Предложено решение задачи с помощью алгоритма с коррекцией параметров структуры управления.

Ключевые слова: математическая модель, моделирование, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, настройка формы, сетеполотно, актюатор

Введение

Основными показателями трансформируемых систем являются высокая точность формы отражающей поверхности после развертывания, ее стабильное состояние в процессе всего периода эксплуатации, надежность раскрытия.

Анализируя существующие разрабатываемые виды больших космических антенн [1, 2], можно сделать вывод, что одним из перспективных направлений является создание крупногабарит-

ного трансформируемого рефлектора (КТР) космического базирования с использованием тросовой системы поддержания формы рефлектора.

Рассмотрим конструкцию КТР с использованием тросовой (вантовой) системы поддержания формы рефлектора (рис. 1). Особенность такой конструкции заключается в большой площади рабочей поверхности в раскрытом состоянии и возможности управления формой рефлектора. Ключевым элементом такого вида антенн является устройство точечной регулировки формы рефлектора. Именно оно должно обеспечивать высокую точность рефлектора и малое среднеквадратичное отклонение (СКО).

Рефлектор состоит из фронтальной сети, которая натянута на силовой каркас, вант, с помо-

¹ Исследования представленные в I и II частях статьи выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00646 А.

² Часть I опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2020, Т. 21, № 1.

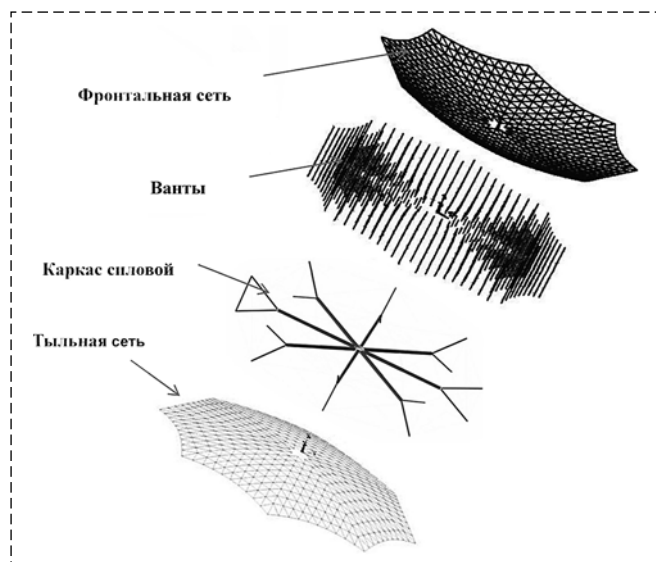


Рис. 1. Крупногабаритный трансформируемый рефлектор
Fig. 1. The large transformable reflector

стью которых происходит оттяжка фронтальной сети к тыльной сети для задания необходимой отражающей поверхности.

В общем виде задача настройки формы радиоотражающего сетеполотна КТР решается за счет воздействия на конструкцию исполнительного устройства системы управления — актюаторов.

Автоматические системы, в которых энергия для настройки рефлектора производится за счет приводов, в частности пьезоактюатора, двигателя постоянного тока (ДПТ), сервомотора, позволяют управлять процессом настройки и поддержания, тем самым поддерживать рефлектор в рабочем состоянии на всем времени его эксплуатации.

Использование таких приводов требует наличия системы управления, базирующейся на использовании информации о состоянии системы. Поэтому дополнительно встает вопрос о датчиках обратной связи, их числе, точности и периодичности работы, вследствие чего может возникнуть задача фильтрации данных, задача программирования или синтеза управления. Как итог, на основе численного моделирования необходимо выработать стратегию управления настройкой КТР.

Следует отметить, что особую актуальность вопросу придает тот факт, что за последнее десятилетие достигнут огромный прогресс в компьютерной технике, который позволяет выполнять объемные вычислительные операции за короткое время. Вследствие этого целе-

сообразно для развертывания КТР применять алгоритмы оптимального управления [3—7].

Для корректного функционирования рефлектора на орбите требуется возможность управления формой отражающей поверхности путем натяжения фронтальной сети.

Рассмотрим настройку радиоотражающего сетеполотна крупногабаритной трансформируемой космической конструкции. Внешний вид антенны представлен на рис. 1. Конструктивно антенна состоит из силового каркаса, формирующей структуры и радиоотражающего сетеполотна.

Формообразующая структура предназначена для формирования формы радиоотражающей поверхности рефлектора и поддержания ее в процессе всего срока эксплуатации спутника. Она состоит из фронтальной и тыловой сетей, связываемых между собой системой вант. Формообразующая структура служит основой построения системы поднастройки рефлектора, так как имеет большое число кинематических связей с поверхностью рефлектора.

Для образования и поддержания формы рефлектора фронтальная и тыловые сети соединены вантовыми подкреплениями (оттяжками). Ванты соединяют противоположные узлы сетей. Наземная настройка заключается в подстройке начальных длин оттяжек с учетом влияния сил гравитации и системы обезвешивания.

Вантовая система является основой для построения системы поднастройки. Миниатюрные мехатронные модули могут быть расположены на каждой из подстраиваемых вант. В основе мехатронного узла лежит миниатюрный линейный привод.

Настройка сетеполотна в одной плоскости

Рассмотрим плоскую модель управления формой сетеполотна. На рис. 2 приведена одна спица, два главных радиальных шнура тыльной и фронтальной сетей и ванты, идущие между ними.

Здесь 1 — шнур, соединяющий концы звеньев 2 и 3 (позволяющие задать параболическую форму сетеполотна); 2 и 3 — концевые звенья спицы; 4 — главный радиальный шнур фронтальной сети; 5 — главный радиальный шнур тыльной сети; 6 — корневое звено спицы; 7 — ванты, соединяющие главные радиальные шнуры с узлами фронтальной и тыльной сетей.

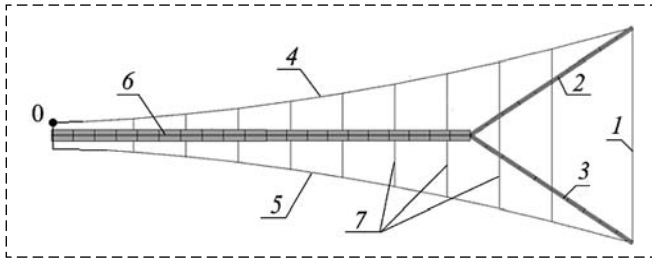


Рис. 2. Ванты, спица и главные радиальные шнуры (вид сбоку)
Fig. 2. The gore, spoke and main radial cords (side view)

В качестве начала координат выберем точку крепления главного радиального шнура фронтальной сети к основе силового каркаса (точка 0 на рис. 2).

Ввиду симметрии левой и правой ветвей параболы, а также принимая во внимание тот факт, что центральная точка в основании корневого звена спицы и концевые точки жестко закреплены, будем исследовать управление только правой части.

В каждой ванте находится по одному актюатору. Настройка формы происходит путем изменения длины ванты в каждой точке крепления ванты к фронтальной сети.

Выведем уравнения, описывающие зависимость формы сетеполотна от силы натяжения в определенных точках этого полотна. Для этого определим форму, которую имеет фронтальная сеть. Рассмотрим случай настройки формы отражающей поверхности в космическом пространстве путем натяжения формы только в одной плоскости.

Рассмотрим часть сетеполотна с двумя фиксированными точками (*A* и *B*) и приложенной силой между ними (рис. 3). Запишем уравнение равновесия для такой системы при условии, что стрела провисания нити мала по сравнению с горизонтальным пролетом между этими фиксированными точками [8].

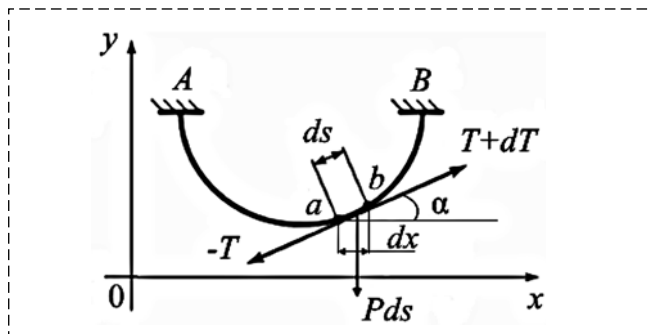


Рис. 3. Силы в сетеполотне при заданном натяжении
Fig. 3. Forces in the network at a given tension

Примем, что сила натяжения нити T равна константе, и приложение силы P происходит достаточно медленно, так что можно считать данный режим статическим. Рассмотрим равновесие элемента нити $ab = ds$. В точке a на нить действует натяжение нити T , тогда в точке b будет действовать сила $T + dT$. Помимо этого на элемент ds действует сила Pds .

Тогда, используя графический метод [9, 10], т. е. записав проекции действующих сил на оси координат, можно получить:

$$0x: (T + dT) \frac{dx}{ds} - T \frac{dx}{ds} = 0;$$

$$0y: (T + dT) \frac{dy}{ds} - T \frac{dy}{ds} - Pds = 0.$$

Раскрыв скобки и проделав необходимые математические преобразования, получим $dT \frac{dx}{ds} = 0$ и $\frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) - P = 0$. Из первого выражения следует, что $T \frac{dx}{ds} = C_1 = \text{const}$, т. е. проекция натяжения на ось x есть величина постоянная.

Сила натяжения T направлена по касательной к кривой фронтальной сети. Тогда можно записать, что $\cos \alpha = \frac{dx}{ds}$ и $C_1 = T \cos \alpha$, где α — угол между касательной к кривой сетеполотна и осью $0x$. Силу воздействия на сеть запишем как $P = q(x) \frac{dx}{ds}$, где $q(x)$ — распределенная по длине нагрузка (в случае наличия n точек натяжки можно записать $\frac{1}{n} \sum P_i$, где i — номер точки приложения силы).

Нить сетеполотна, находящаяся в равновесии под действием вертикальной нагрузки, имеет форму параболы [10].

Определим форму радиоотражающего сетеполотна по трем точкам в зависимости от приложенной силы P (рис. 4). Точки 0 и B будем

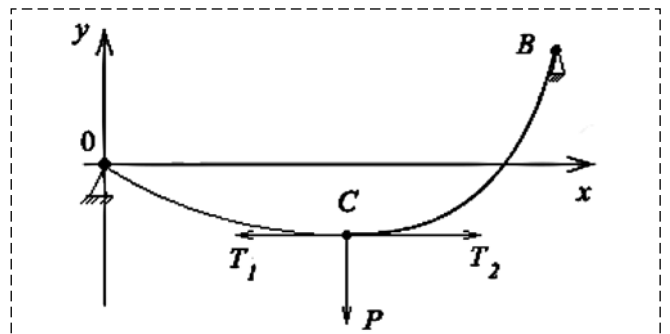


Рис. 4. Форма сетеполотна при приложении силы P
Fig. 4. Network form when force P is applied

считать жестко закрепленными и не перемещающимися. Примем, что отрезки $0C$ и CB являются параболы с пересечением в точке C . Тогда для этих парабол, приняв, что подстрочные индексы 1 и 2 обозначают принадлежность к первой и второй параболе соответственно, а E_1 и E_2 — коэффициенты, запишем:

$$0C: y_1 = \frac{q}{C_{11}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_1 x \right) + E_1;$$

$$CB: y_2 = \frac{q}{C_{12}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_2 x \right) + E_2.$$

Запишем проекции действующих сил в точке C на оси:

$$0x: -T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 = 0; \quad (1)$$

$$0y: -T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 - P = 0. \quad (2)$$

Из уравнения (1) получаем $C_1 = C_2 = C$. Далее, подставив $T_1 = T_2 = \frac{C}{\cos \alpha_1} = \frac{C}{\cos \alpha_2}$ в уравнение (2), получаем

$$-C \operatorname{tg} \alpha_1 + C \operatorname{tg} \alpha_2 - P = 0.$$

Для общей точки C из условия $y_1 = y_2$ находим:

$$\frac{q}{C_{11}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_1 x \right) = \frac{q}{C_{12}} \left(\frac{x^2}{2} - \delta_2 x \right) + E_2.$$

Для настройки формы радиоотражающей поверхности необходимо выбрать точку настройки, отрегулировать ее положение и сравнить получившуюся кривую с желаемой кривой. Увеличение числа точек регулирования ведет к увеличению числа уравнений, связывающих каждую точку с другой.

Определение силы натяжения

Для проведения моделирования рассмотрим частную задачу. Нить сетеполотна натянута между двумя фиксированными точками с координатами $0 = [0; 0]$ и $B = [10; 2]$ и имеет форму параболы, описываемую уравнением $y = 0,02x^2$. Координаты точки C при заданной форме примем $C = [5; 0,5]$. Нить находится в натянутом состоянии, т. е. силы натяжения нити T уравновешены силой оттяжки P .

Необходимо перенастроить форму антенны в виде параболы в заданную форму, определя-

емую уравнением $y = 0,025x^2 - 0,05x$ при фиксированных граничных точках. Точка C при этом будет иметь координаты $C = [5; 0,375]$. Задача состоит в определении силы P .

Сделаем следующие допущения, необходимые для решения поставленной задачи. Нить сетеполотна находится в космическом пространстве, и на нее не действуют силы тяжести. Минимальная длина нити L_{\min} определяется по прямой, соединяющей точки 0 и C .

Определим длину нити в свободном состоянии при закрепленных конечных точках (кривая l на рис. 5):

$$L_{\min} = \sqrt{l^2 + h^2} = 10,198.$$

Исходя из закона Гука можно записать

$$\Delta T = \frac{\Delta l}{L} ES, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$ — разность сил натяжения нити в точке C (рис. 5); $\Delta l = l_2 - l_1$ — разность длин нити на участке CB и $0C$; E — модуль упругости; S — площадь сечения нити.

Из уравнения (2) выразим силу натяжения нити P :

$$P = -T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2.$$

В точке C : $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Поэтому можно переписать

$$P = (T_2 - T_1) \sin \alpha = \Delta T \sin \alpha. \quad (4)$$

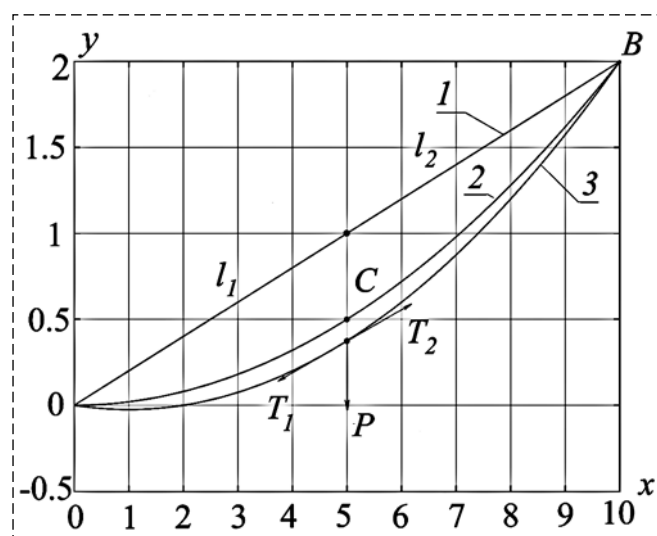


Рис. 5. Определение приложенной силы P
Fig. 5. Determination of applied force P

Так как $y' = \operatorname{tg} \alpha$, то можно вычислить значение угла α .

Определим значение силы оттяжки P при ненапрянутом состоянии (кривая 1 на рис. 5). Так как $\Delta l = 0$, то, соответственно, из (4) имеем $P = 0$. Нить находится в свободном состоянии.

При форме параболы, описываемой уравнением $y = 0,02x^2$ (кривая 2 на рис. 5), находим длину нити $l_1 = 5,06$ и $l_2 = 5,26$. По формуле (3) находим ΔT . Принимаем, что нить состоит из вольфрама ($E = 350 \cdot 10^9$ Па), диаметр нити равен 3 мм. Тогда $\Delta T = 1,9 \cdot 10^6$. Из соотношения (4) вычисляем силу, потребную для поддержания исходной формы: $P = 6632$ Н.

Проделаем аналогичные вычисления для желаемой параболы, описываемой уравнением $y = 0,025x^2 - 0,05x$ (кривая 3 на рис. 5): $P = 44\,137$ Н.

Настройка сетеполотна в пространстве

Для определения формы радиоотражающего сетеполотна в пространстве удобно представить ее в виде мембраны. Тогда дифференциальное уравнение мембраны можно описать уравнением Лапласа [11]:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\frac{q}{S}, \quad (5)$$

где x, y, z — оси координат; q — распределенная нагрузка; S — площадь поверхности.

При решении задачи определения формы радиоотражающего сетеполотна удобно перейти к полярным координатам, так как рефлектор имеет форму параболоида. В этом случае в силу симметрии уравнение, описывающее прогиб мембраны, сводится к следующему:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} = -\frac{p}{S}.$$

На рис. 6 представлен пример определения формы сетеполотна на одной фасете (части отражающей поверхности).

Полагая $q = 0$ в уравнении (5), т. е. считая, что на мембрану не действует поперечная нагрузка, приходим к уравнению

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0.$$

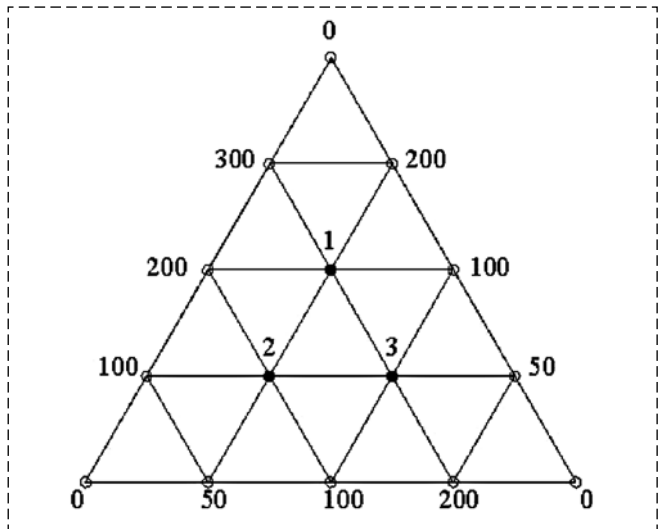


Рис. 6. Фасета радиоотражающего сетеполотна
Fig. 6. Facet of radioreflexion network

Для определения узловых значений функции прогиба z составим систему линейных уравнений, удовлетворяющую уравнению Лапласа:

в точке (1): $300 + 200 + 100 + 200 + z_2 + z_3 - 6z_1 = 0$;
в точке (2): $100 + 200 + 100 + 50 + z_1 + z_3 - 6z_2 = 0$;
в точке (3): $100 + 100 + 200 + 50 + z_1 + z_2 - 6z_3 = 0$.

Решение этой системы следующее:

$$z_1 = 175, z_2 = 125, z_3 = 125.$$

Это и есть значение прогиба в данных точках. По значениям функции z можно аппроксимировать, например, методом меньших квадратов, параболоид. Если мембрана испытывает какое-либо давление, то в правых частях уравнений появятся соответствующие слагаемые вместо нуля.

Как результат, исходя из заданной формы сетеполотна можно вычислить значение усилий, необходимых для натяжения и настройки формы, а также посчитать разницу в прогибах при нынешней форме и при желаемой.

Настройка формы радиоотражающей поверхности проводится за счет управления актюаторов поодиночно или совместно некоторой группой в зависимости от поставленной задачи.

Моделирование актюаторов

В качестве актюаторов рассматривались пьезопровод, двигатель постоянного тока (ДПТ), сервопривод.

Рассмотрим применение пьезоактюатора [12]. Отметим, что применение пьезоэлектрических элементов общеизвестно, например, для регистрации деформации деталей конструкции, когда пьезоэлементы устанавливаются на деталях и перемещаются по мере деформирования детали. Вместе с тем пьезоэлементы оказывают целенаправленное воздействие на деталь, в частности, деформируют ее. В авиации пьезоэлементы применяются для аэродинамических профилей, сонаров, гидрофонов, гироскопов, а также для больших вогнутых зеркал, например в телескопах, и во многих других случаях [13–15].

Пьезоэлектрические материалы и элементы на их основе высоконадежны, устойчивы к воздействию различных агрессивных сред, имеют малые массогабаритные показатели, высокую радиационную стойкость и термостойкость, диэлектрическую природу [16]. Данные свойства особенно важны при проектировании аппаратуры, предназначенной для работы в космосе. В связи с этим в ряде работ рассматривается использование данного типа актюаторов в космической отрасли [17–19].

Для решения задачи управления пьезоактюатором следует определиться с его конструктивными особенностями и на основании этого ввести ряд условий и допущений.

Будем считать, что пьезоактюатор, закрепленный на тыльной сети рефлектора космического аппарата, неподвижен, имеет известные первоначальные размеры: l_0 , S — начальная длина и поперечное сечение актюатора. Первоначальный размер изменяется под действием электрического поля, перемещая приведенную массу m_0 . Таким образом, суммарная масса m_Σ состоит из массы самого пьезоактюатора m_a и перемещаемой массы.

При дальнейшем решении задачи принимаются также следующие допущения:

- изменение размера актюатора на один-два порядка меньше его изначального размера;
- актюатор допустимо рассматривать как один монолитный элемент;
- актюатор перемещается только вдоль одной оси.

С учетом принятых допущений и условий воспользуемся математической моделью Никольского [20] для монолитного пьезоэлемента, который рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами.

Система дифференциальных уравнений, описывающих пьезоэлемент с исполнительным органом, имеет следующий вид [20]:

$$\begin{aligned}\Delta l &= V; \\ \dot{V} &= \frac{K_0 U + F_c - K_y \Delta l - K_d V}{m_\Sigma}; \\ \dot{U} &= \frac{e_\Pi}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{U}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{K_\Pi V}{C_0 K_d},\end{aligned}\quad (6)$$

где Δl — изменение длины (ход) актюатора; V — скорость выдвижения актюатора; K_0 — коэффициент обратного пьезоэффекта; U — напряжение, приложенное к электродам актюатора; F_c — статическое усилие; K_y — коэффициент упругости; K_d — коэффициент внутреннего демпфирования; e_Π — напряжение от источника электродвижущей силы (питания); C_0 — емкость; $R_{\text{вт}}$ — внутреннее сопротивление; K_Π — коэффициент прямого пьезоэффекта.

В этой линейной динамической модели пьезоактюатора (6) не учтено влияние потерь на внутреннее трение (механические потери) и дипольную релаксацию (диэлектрические потери). Дипольная релаксация и внутреннее трение — это сложные и многообразные процессы, действующие на молекулярном и даже на электронном уровне. Эта модель актюатора может рассматриваться в качестве первого приближения.

Система уравнений (6) решалась с учетом неподвижности и жесткого закрепления ответной части рефлектора.

Задача управления состоит в приведении пьезоактюатора из начального положения ($\Delta l_0 = 0$ м; $V_0 = 0$ м/с; $U_0 = 0$ В) в заданное конечное состояние ($\Delta l_f = 1 \cdot 10^{-7}$ м; $V_f = 0$ м/с; $U_f = 0$ В) при ограничении на управление, за которое принято напряжение от источника электродвижущей силы $e_\Pi = \pm 10$ В.

При наличии постоянно меняющихся внешних условий и возмущающих факторов важной задачей является максимальное быстрое действие при регулировании как каждого отдельно взятого актюатора, так и группы актюаторов. Для выбора управления сравним использование различных вариантов структуры пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД регулятора) и оптимального регулятора [3, 6, 7].

При моделировании системы (6) с использованием различных структур ПИД регулято-

ра удалось добиться необходимых параметров регулирования. При этом для измерений было доступно линейное перемещение Δl . Время переходного процесса составило $t \approx 2$ с. Настройка коэффициентов ПИД регулятора осуществлялась с помощью тюнинга в блоке PID Controller в Simulink.

Аналогичным образом решается задача управления длиной пьезоактюатора с использованием оптимального регулятора [3, 6, 7].

Для задачи о минимизации времени критерий оптимальности будет иметь вид $J = t_f$

Запишем гамильтониан системы (6):

$$H = P_{\Delta l} V + P_V \left(\frac{K_0 U + F_c - K_y \Delta l - K_d V}{m_{\Sigma}} \right) - P_U \left(\frac{e_{\Pi}}{R_{\text{вт}} C_0 K_d} - \frac{U}{R_{\text{вт}} C_0 K_d} - \frac{K_{\Pi} V}{R_{\text{вт}} C_0 K_d} \right).$$

При решении задачи оптимальности по быстрой структуре управления согласно принципу максимума Понтрягина примет вид [3, 6, 7]:

$$e_{\Pi}(t) = e_{\Pi \max} \text{sign} P_U(t).$$

Согласно теореме Фельдбаума [21] число предельных переключений управления e_{Π} для системы уравнений (6) не должно превышать двух.

Краевая задача, возникающая из принципа максимума, решалась методом наискорейшего спуска [22]. Данный метод позволил найти начальные значения сопряженных переменных $P_{\Delta l}(0) = -617$, $P_V(0) = -400$, $P_U(0) = 1 \cdot 10^{-5}$, при которых удастся перевести систему в заданное конечное состояние.

Результаты моделирования, которое проводилось в программной среде MATLAB Simulink, представлены на рис. 7. Из полученных характеристик можно сделать вывод, что при найденном управлении достигаются конечные заданные значения по линейному перемещению, скорости и напряжению. Стоит отметить, что линейное перемещение происходит без возникновения колебательного процесса, а время достижения конечного состояния существенно меньше, чем у модели с использованием ПИД регулятора, и составляет $t \approx 0,6$ с.

Найденное управление e_{Π} переключается один раз. Как видим (рис. 7), после достижения граничных значений длина выдвижения незначительно просаживается. Связано это с тем, что от e_{Π} зависит напряжение, прило-

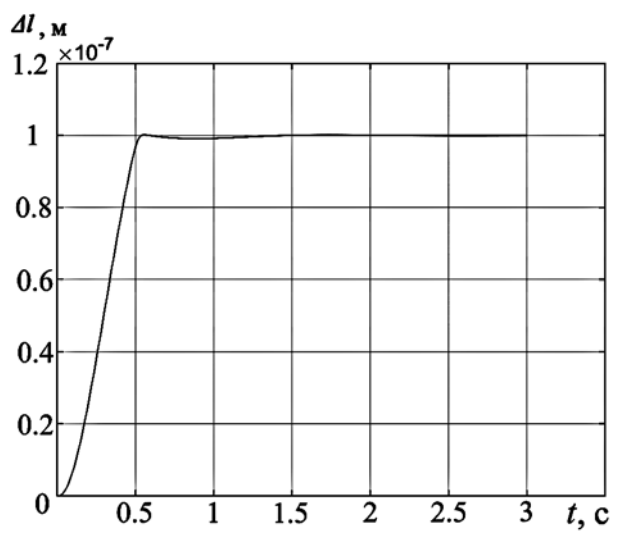


Рис. 7. Длина выдвижения активной части пьезоактюатора
Fig. 7. Extension length of the active part of the piezoactuator

женное к электродам актюатора (U), которое изменяется не релейно, а с некоторым запаздыванием. В связи с этим при достижении граничных условий, когда происходит переключение e_{Π} из минимального в заданное состояние, происходит изменение U . Данный эффект можно минимизировать, если изменять управление не по предельным значениям, а например, трапециевидно. В обоих случаях выбранная из принципа максимума структура управления зависит от моментов ее переключения. Вводя управление моментами переключения структуры с переходом к вспомогательной задаче оптимизации этих моментов [3], целесообразно воспользоваться алгоритмом оптимальной коррекции структуры управления [5, 7]. В этом случае задача оптимизации решается в реальном времени.

Использование оптимального регулятора позволяет сократить время переходного процесса по сравнению с ПИД регулятором. Таким образом, использование алгоритма оптимального регулятора для настройки формы радиотражающего сетеполотна за счет регулирования пьезоактюатора позволит значительно ускорить этот процесс и, как следствие, поддерживать заданную форму сетеполотна с необходимой точностью.

Двигатель постоянного тока

Электродвигатели являются одним из самых массовых изделий электротехники. Ввиду

своего предназначения (перевод электрической энергии в механическую) данный тип двигателя нашел свое применение во многих областях техники [23, 24]. Это объясняется широким диапазоном и плавностью регулирования скорости вращения электродвигателя.

Несмотря на то что электрическая машина хорошо известна и имеются подробные математические модели, описывающие процессы, происходящие при ее работе, управление, в частности электрическим двигателем постоянного тока, является актуальной задачей [25–29]. Дело в том, что в зависимости от конкретно поставленной задачи будут различаться и алгоритмы управления.

Рассмотрим параметры двигателя постоянного тока (ДПТ), приведенные в работе [30].

Система уравнений, описывающая ДПТ с учетом угла поворота вала, имеет вид [23, 24]

$$\begin{aligned} \dot{I}_я &= \frac{U_a - R_я I_я - k_e \omega_d}{L_я}; \\ \dot{\omega}_d &= \frac{k_m I_я - M_{вн}}{J_я}; \\ \dot{\varphi}_м &= \omega_d, \end{aligned} \quad (7)$$

где $I_я$ — ток якоря; U_a — внешнее напряжение; $R_я$ — активное сопротивление обмотки якоря; k_e — коэффициент пропорциональности (постоянная ЭДС двигателя); ω_d — угловая скорость вращения вала двигателя; $L_я$ — индуктивность якорной обмотки; k_m — коэффициент пропорциональности (постоянная момента двигателя); $M_{вн}$ — момент внешних сил; $J_я$ — момент инерции ротора двигателя; $\varphi_м$ — угол (механический) поворота вала двигателя.

Задача управления состоит в приведении вала ДПТ из начального положения $\varphi_{м0} = 0^\circ$, $\omega_{д0} = 0^\circ/\text{с}$, $I_{я0} = 0^\circ/\text{А}$ в заданное конечное состояние $\varphi_{мf} = 180^\circ$, $\omega_{df} = 0^\circ/\text{с}$, $I_{яf} = 0^\circ/\text{А}$ при ограничении на управление, за которое принято внешнее напряжение питания $U_a = \pm 6$ В. Данный угол поворота $\varphi_м$ будет обеспечивать изменение длины ванта.

При управлении в космическом пространстве одной из важных проблем является проблема энергоэффективности, так как запас энергии на рефлекторе ограничен и необходимо выполнить поставленную задачу, минимизируя энергетические затраты. Для выбора управления сравним использование различных вариантов структуры ПИД регулятора и оптимальный регулятор.

При проведении моделирования для определения параметров двигателя постоянного тока возьмем в качестве исследуемого объекта двигатель СН1, который является аналогом двигателя *tabuchi* FA-130.

При моделировании системы (7) с использованием различных структур ПИД регулятора удалось добиться необходимых параметров регулирования системы при применении ПИД регулятора. При этом измерениям был доступен угол $\varphi_м$. Время переходного процесса составило $t \approx 0,75$ с. Настройка коэффициентов регулятора осуществлена с помощью тюнинга в блоке PID Controller в Simulink.

Аналогичным образом решается задача управления двигателем постоянного тока с использованием оптимального регулятора [3, 6, 7].

При оптимизации перевода системы из одного положения в другое с фиксированным начальным и конечным состоянием выберем критерий Больца с интегро-терминальным критерием:

$$I = V_f(I_я, \omega_d, \varphi_м, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(U_a, t) dt.$$

Положим

$$\begin{aligned} V_f &= 0,5\rho_1[I_я(t_f) - I_{яf}]^2 + 0,5\rho_2[\omega_d(t_f) - \omega_{df}]^2 + \\ &+ 0,5\rho_3[\varphi_м(t_f) - \varphi_{mf}]^2; \\ f_0 &= 0,5(U_a/Z)^2 k^{-2}, \end{aligned}$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 — весовые коэффициенты; t_0 — начальное время; t_f — конечное время; Z — импеданс обмотки якоря. Поскольку была поставлена задача минимизации энергетических затрат, то в качестве функции f_0 было взято выражение для затрачиваемого напряжения питания U_a на всем интервале моделирования.

Гамильтониан системы (7) имеет вид:

$$\begin{aligned} H &= P_{\varphi_м} \omega_d + P_{\omega_d} \frac{k_m I_я - M_{вн}}{J_я} + \\ &+ P_{I_я} \frac{U_a - R_я I_я - k_e \omega_d}{L_я} + 0,5(U_a/Z)^2 k^{-2}. \end{aligned}$$

Управление находится из условия $\partial H / \partial U_a = 0$ с учетом ограничения на управление:

$$U_a = \begin{cases} 6 & \text{при } U_a > 6; \\ -P_{I_я} \frac{Z}{L_я} & \text{при } -6 \leq U_a \leq 6; \\ -6 & \text{при } U_a < -6. \end{cases}$$

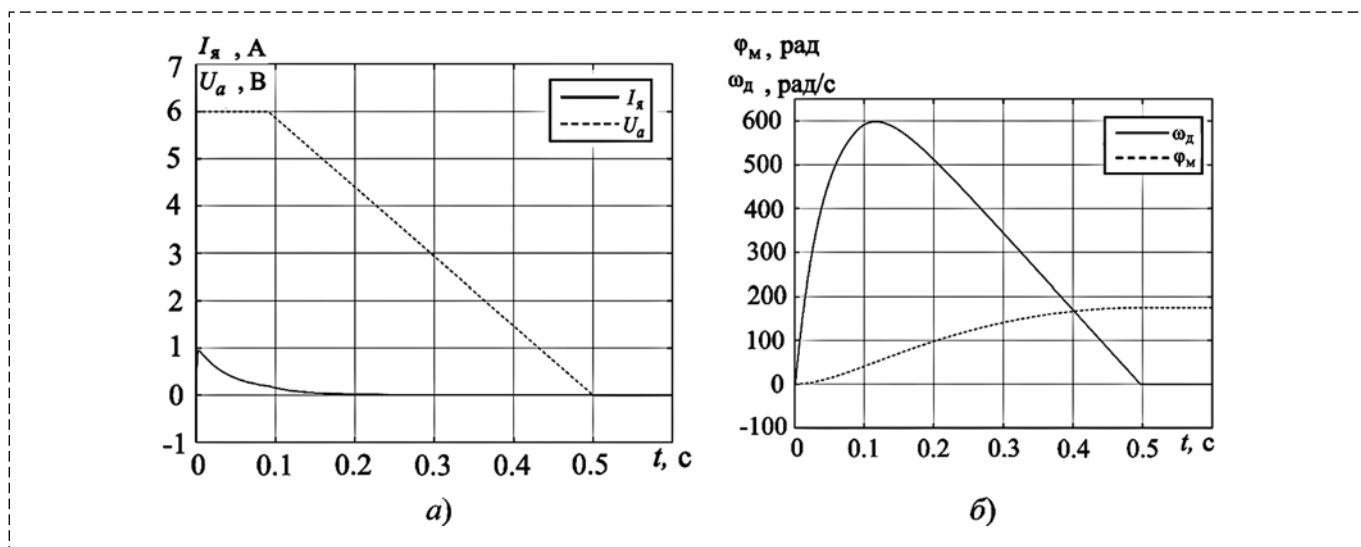


Рис. 8. Динамика угла, угловой скорости (а) и тока, напряжения (б)
Fig. 8. Dynamics of angle, angular velocity (a) and current, voltage (b)

Для решения данной задачи по принципу максимума необходимо найти начальные приближения сопряженных переменных $P_{\Phi_M}(0)$, $P_{\omega_d}(0)$, $P_{I_a}(0)$. Возникшая краевая задача решалась методом наискорейшего спуска [22]. Были найдены начальные значения сопряженных переменных $P_{\Phi_M}(0) = -0,0019$, $P_{\omega_d}(0) = 0,01$, $P_{I_a}(0) = 0,1$, при которых удается перевести систему в заданное конечное состояние.

Результаты моделирования представлены на рис. 8.

Из полученных характеристик видно, что найденное управление позволяет достичь конечных значений по углу, угловой скорости, а также току ДПТ. Колебательный процесс в системе не наблюдался. Время переходного процесса составило $t \approx 0,5$ с. При этом удалось снизить энергетические затраты для заданной задачи управления.

Сравнение результатов моделирования при различных начальных и конечных значениях для ПИД регулятора и оптимального регулятора показало преимущество использования алгоритма оптимального управления.

Сервомотор

В связи с отсутствием реализованного редуктора был рассмотрен сервомотор NXT, который является сочетанием ДПТ, редуктора и датчика вращения, объединенных вместе в одном корпусе. Применение и управление данным сервомотором досконально исследованы, поэтому было принято решение использовать

систему (7) для описания двигателя постоянного сервомотора NXT, а коэффициенты пропорциональности $k_e = 0,42$ и $k_m = 0,48$ были рассчитаны исходя из параметров привода, описанных в работе [31].

Для синтеза управления был использован алгоритм, применяемый для ДПТ со следующими условиями: $|U_{a \max}| = 6$ В, $\Phi_{Mf} = 180^\circ$, $\omega_{def} = 0^\circ/\text{с}$.

Полученные характеристики схожи с результатами, представленными в работе [32]. Имеются различия в характеристиках тока и угловой скорости, что может быть связано с тем, что примененные методы расчета коэффициентов пропорциональности в работах [31] и [32] разнятся.

Заключение

Для выбранного типа рефлектора допустимо применять механику гибких нитей для определения формы и настройки радиоотражающего сетеполотна. Рассматривая задачу в одной плоскости с настройкой формы по трем точкам, можно определить усилия, необходимые для оттяжки нити и задания необходимой формы.

Полученные уравнения позволяют рассчитывать усилие оттяжки для нитей из разных материалов и при разных начальных условиях натяжения.

Данный подход можно расширить на n точек как в одной плоскости, так и в трехмерном пространстве, что приведет к увеличению числа

уравнений, которое будет зависеть от степени точности. Также можно рассматривать зависимость соседних или же нескольких точек.

В качестве актюаторов для настройки формы радиоотражающей поверхности рассмотрены пьезопривод, двигатель постоянного тока, сервомотор. Это позволяет в зависимости от задачи выбрать наиболее выгодный вариант исполнительного устройства. Для всех типов актюаторов решена задача управления при минимизации энергетических затрат. Показано преимущество использования алгоритмов теории оптимального управления. Для решения данных задач в режиме реального времени предполагается использовать алгоритм с коррекцией параметров структуры [3, 5–7, 33, 34].

Список литературы

1. Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2011. № 4. С. 110–119.
2. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкции современных трансформируемых космических антенн (часть I) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 78–81.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
4. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.
5. Малышев В. В., Кабанов Д. С. Алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом для построения области достижимости // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 7. С. 21–27.
6. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: СПбГУ, 1997. 200 с.
7. Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Задачи управления с оптимизацией параметров прогнозирующих моделей. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2017. 110 с.
8. Светлицкий В. А. Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
9. Санкин Ю. Н. Лекции по теоретической механике. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 388 с.
10. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.
11. Сальвадори М. Д. Численные методы в технике. М.: ИЛ, 1955. 247 с.
12. Кабанов С. А., Митин Ф. В., Кривушов А. И., Улыбушев Е. А. Управление пьезоактюатором для настройки отражающей поверхности рефлектора космического базирования // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 111–116.
13. Панкратов В. М., Барулина М. А., Крысько А. В. Влияние расстройки парциальных частот чувствительных элементов на амплитудно-частотные характеристики микромеханических гироскопов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 2. С. 99–105.
14. Белоусов Е. О. Метод подавления шумов схемы обработки микроэлектромеханического датчика угловой скорости // Тр. МАИ. 2016. № 90. С. 1–19.
15. Храпцов А. М. Напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов пьезоактюатора: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Томский государственный университет, 2017. 24 с.
16. Бобцов А. А. и др. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 131 с.
17. Hasan Z. Shape and Failure Control of Composite Laminates Using Piezoelectric Actuators // Proc. of the COMSOL Conference, Oct. 7–9, 2010, Boston. P. 314–321.
18. Hasan Z., Muliana A. Analysis and Control of Smart Composite Laminates Using Piezoelectric Materials // Proc. of the 6th Annual Technical Conference of the American Society for Composites 2011: The 2nd Joint US–Canada Conference on Composites, Sept. 26–28, 2011, Montreal, Quebec, Canada. Vol. 1. P. 530–546.
19. Gajbhiye S. C., Upadhyay S. H., Harsha S. P. Nonlinear Vibration Analysis of Piezo-Actuated Flat Thin Membrane // Journal of Vibration and Control. 2015. Vol. 21, Iss. 6. P. 1162–1170.
20. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
21. Фельдбаум А. А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 1953. Т. 14, Вып. 6. С. 712–728.
22. Малышев В. В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления. М.: МАИ-Принт, 2010. 440 с.
23. Вольдек А. И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. заведений. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
24. Kundur P. Power system stability and control. Mc. Graw-Hill, Inc, 1994. 1176 p.
25. Fedor Mitin, Alexey Krivushov (2018). Application of Optimal Control Algorithm for DC Motor, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, pp. 0762–0766, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings110.
26. Гридин В. М. Моментные бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным и дискретно-аналоговым управлением по положению ротора // Электричество. 2017. № 4. С. 50–55.
27. Гуляев И. В., Волков А. В., Попов А. А., Ионова Е. И., Бобров М. А. Сравнительный обзор синхронного двигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного двигателя постоянного тока при непосредственном управлении моментом // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 123–128.
28. Pongfai J., Assawinchaichote W. Optimal PID parametric auto-Adjustment for BLDC motor control systems based on artificial intelligence // 2017 International Electrical Engineering Congress, iEECON 2017 8075892.
29. Hou H., Yao W., Zhang W. A Novel Control Strategy of Single Phase Brushless DC Motor for Automotive Air Conditioning // 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2016 — Proceedings 7791581.
30. Рентюк В. Управление двигателем постоянного тока // Компоненты и технологии. 2014. № 10 (159). С. 110–114.
31. Philo's Home Page [Электронный ресурс]: NXT® motor internals. URL: <http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm> (дата обращения 16.02.2019).
32. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву, Л.: Энергия, 1971. 144 с.
33. Кабанов С. А., Емельянов В. Ю., Митин Ф. В. Оптимизация динамики системы создания формы крупногабаритных трансформируемых антенн космического базирования // Вопросы радиоэлектроники. 2016. Серия ОТ. Вып. 8. С. 54–58.
34. Кабанов С. А., Кривушов А. И., Митин Ф. В. Моделирование совместного раскрытия элементов крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического базирования // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 5 (54). С. 130–151.

Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part II

S. A. Kabanov, kaba-sa@mail.ru, B. A. Zimin, bazimin@mail.ru, F. V. Mitin, fedor28@list.ru, BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: **Mitin Fedor**, Ph.D. Student, Baltic state technical university "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: fedor28@list.ru

Accepted on June 01, 2019

Abstract

The process of deployment elements of constructions and adjustment of the radio-reflecting network of large-sized transformable space-based reflector is considered. The reflector consists of a frontal network, which is stretched on the power frame, cables, with which the front network is pulled to the rear network to set the desired shape of the reflecting surface. The problem of setting and determining the shape of the radio-reflective network is solved both in one plane and in three planes. In general, the task of adjusting the form of a radio reflecting reticle is solved by affecting the design of the actuators — the element of the control system. For the correct functioning of the reflector in orbit, it is necessary to control the shape of the reflecting surface by stretching the frontal network. For the formation and maintenance of the shape of the reflector, the frontal and rear networks are connected by cable-stayed reinforcements (tie rods). The cable connect the opposite network nodes. The cable system is the basis for building a sub-system. Miniature mechatronic modules can be located on each of the adjustable guys. To adjust the shape in one plane, the technique of flexible threads is applied. The possibility of changing the surface by simultaneous action of one or more actuators is shown. To adjust the shape in space, the membrane method described by the Laplace equation is used. The piezo actuator, DC motor and servomotor are considered as actuators for setting the shape. As a mathematical model of the piezoactuator, the model of A. A. Nikolsky is considered. The system is solved taking into account rigid fixation of the reflector response. A comparison of the use of PID-controller and optimal controller. The structure of optimal control is revealed from the maximum principle. The arising two-point boundary value problem is solved by the methods of the steepest descent and Newton. It is shown that the use of optimal control can reduce the time of the transition process. A similar problem was solved for DC motor and servo motor. The advantage of using optimal control methods is shown for all actuators. The solution of the problem with the help of algorithm with correction of parameters of control structure is offered.

Keywords: mathematical model, rotational motion, translational motion, deployment, modeling, large-sized transformable reflector

Acknowledgements: The research presented in parts I and II of the article was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project no. 20-08-00646 A.

For citation:

Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part II, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 117–128.

DOI: 10.17587/mau.21.117-128

References

1. Ponomarev S. V. Transformable reflectors of spacecraft antennas, *Vestn. Tom. gos. un-ta. Matematika i mehanika*, 2011, no. 4(16), pp. 110–119 (in Russian).
2. Lopatin A. V., Rutkovskaja M. A. Overview of the designs of modern transformed space antennas (Part I), *Vestnik SibGAU*, 2007, no. 2, pp. 78–81 (in Russian).
3. Krasovskii A. A. ed. Handbook on the theory of automatic control, Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).
4. Fedorenko R. P. Approximate solution of optimal control problems, Moscow, Nauka, 1978, 488 p. (in Russian).
5. Malyshev V. V., Kabanov D. S. The algorithm for the correction of the control structure of the automatic underwater vehicle to build a reachable area, *Izv. Vuzov. Priborostroenie*, 2012, vol. 55, no. 7, pp. 21–27 (in Russian).
6. Kabanov S. A. *Upravlenie sistemami na prognoziruyushchih modelyah* (Systems control on predictive models). SPb: Izd-vo S.-Peterburgskogo universiteta, 1997, 200 p. (in Russian).
7. Kabanov S. A., Kabanov D. S. Control problems with the optimization of the parameters of predictive models, S.Peterburg, Publishing house of Balt. gos. tehn. un-t, 2017, 110 p. (in Russian).
8. Svetlickij V. A. Mechanics of flexible rods and threads, Moscow, Mashinostroenie, 1978, 222 p. (in Russian).
9. Sankin Ju. N. Lectures on theoretical mechanics, Ul'janovsk, UIGTU, 2012, 388 p. (in Russian).
10. Merkin D. R. Introduction to the mechanics of a flexible thread, Moscow, Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1980, 240 p. (in Russian).
11. Sal'vadori M. D. Numerical methods in engineering, Moscow, IL, 1955, 247 p. (in Russian).
12. Kabanov S. A., Mitin F. V., Krivushov A. I., Ulybushchev E. A. Piezoactuator control for adjusting the reflecting surface of a space-based reflector, *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika*, 2018, no. 4, pp. 111–116 (in Russian).
13. Pankratov V. M., Barulina M. A., Krysko A. V. Influence of detuning of partial frequencies of sensitive elements on the amplitude-frequency characteristics of micromechanical gyroscopes, *Izv. vuzov. Aviacionnaya tekhnika*, 2017, no. 2, pp. 99–105 (in Russian).
14. Belousov E. O. Noise cancellation method for micro-electromechanical angular velocity sensor schema processing, *Tr. MAI*, 2016, no. 90, pp. 1–19 (in Russian).
15. Hramcov A. M. *Stress-strain state of interacting elements of a piezo-actuator*: Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. Nauk, Tomsk, Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2017, 24 p. (in Russian).
16. Bobcov A. A. i dr. Executive devices and systems for microdisplacements, SPb., SPbGU ITMO, 2011, 131 p. (in Russian).
17. Hasan Z. Shape and Failure Control of Composite Laminates Using Piezoelectric Actuators, *Proc. of the COMSOL Conference*, Oct. 7–9, 2010, Boston, pp. 314–321.

18. **Hasan Z., Muliana A.** Analysis and Control of Smart Composite Laminates Using Piezoelectric Materials, *Proc. of the 6th Annual Technical Conference of the American Society for Composites 2011: The 2nd Joint US—Canada Conference on Composites*, Sept. 26—28, 2011, Montreal, Quebec, Canada, vol. 1, pp. 530—546.
19. **Gajbhiye S. C., Upadhyay S. H., Harsha S. P.** Nonlinear Vibration Analysis of Piezo-Actuated Flat Thin Membrane, *Journal of Vibration and Control*, 2015, vol. 21, iss. 6, pp. 1162—1170.
20. **Nikol'skij A. A.** The exact two-channel watching electric drives with piezocompensators, Moscow, Znergoatomizdat, 1988, 160 p. (in Russian).
21. **Feldbaum A. A.** Optimal processes in automatic control systems, *Avtomatika i telemekhanika*, 1953, vol. 14, no. 6, pp. 712—728 (in Russian).
22. **Malyshev V. V.** Optimization methods in problems of system analysis and management: Tutorial, Moscow, Publishing house of MAI-PRINT, 2010, 440 p. (in Russian).
23. **Voldek A. I.** Electric machines. Textbook for high school students. tech. institutions, Leningrad, Jenergija, 1978, 832 p. (in Russian).
24. **Kundur P.** *Power system stability and control*, Mc. Graw-Holl, Inc, 1994, 1176 p.
25. **Fedor Mitin, Alexey Krivushov** (2018). Application of Optimal Control Algorithm for DC Motor, *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*, pp. 0762-0766, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings110.
26. **Gridin V. M.** Torque contactless DC motors with discrete and discrete analogue control by rotor position, *Jelektrichestvo*, 2017, no. 4, pp. 50—55 (in Russian).
27. **Guljaev I. V., Volkov A. V., Popov A. A., Ionova E. I., Bobrov M. A.** Comparative review of a permanent-magnet synchronous motor and a brushless DC motor with direct torque control, *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*, 2015, no. 6, pp. 123—128 (in Russian).
28. **Pongfai J., Assawinchaichote W.** Optimal PID parametric auto-Adjustment for BLDC motor control systems based on artificial intelligence, *2017 International Electrical Engineering Congress, IEECON 2017* 8075892
29. **Hou H., Yao W., Zhang W.** A Novel Control Strategy of Single Phase Brushless DC Motor for Automotive Air Conditioning, *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2016* — Proceedings 7791581.
30. **Rentjuk V.** Dc motor control, *Komponenty i Tehnologii*, 2014, no. 10 (159), pp. 110—114 (in Russian).
31. **Philo's Home Page** [Electronic resource]: NXT® motor internals, available at: <http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm> (date of the application 16.02.2019).
32. **Petrov Ju. P.** Optimal control of the electric drive, taking into account the restrictions on heating, Leningrad, Jenergija, 1971, 144 p. (in Russian).
33. **Kabanov S. A., Krivushov A. I., Mitin F. V.** Modeling of joint deployment of units of the large-sized transformable reflector of space basing, *SPIRAS Proceedings*, 2017, vol. 5(54), pp. 130—151 (in Russian).
34. **Kabanov S. A., Emel'janov V. Ju., Mitin F. V.** Optimization of the dynamics of the system for creating the shape of large-size transformed space-based antennas, *Voprosy Radioelektronikim* 2016, no. 8, ser. OT, iss. 6, pp. 54—58 (in Russian).

Информация

Продолжается подписка на журнал "Мехатроника, автоматизация, управление"

Оформить подписку можно в любом отделении Почты России, через подписные агентства или непосредственно в редакции журнала. Подписной индекс по Объединенному каталогу "Пресса России" — 79492.

Сообщаем, что с 2020 г. возможна подписка на электронную версию нашего журнала через:

- ООО "ИВИС". Контакты для подписчиков — тел.: (495) 777-65-57, (495) 777-65-58, e-mail: sales@ivis.ru
- ООО "УП Урал-Пресс". Для оформления подписки (индекс 013310) следует обратиться в филиал по месту жительства — <http://ural-press.ru>

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5510, (499) 269-5397

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 28.11.2019. Подписано в печать 15.01.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН220. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru