



УДК 629.7

Макаров А.Л.¹, Хорошилов С.В.², Попель В.М.¹¹ Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное" им. М.К. Янгеля". Украина, Днепропетровск.² Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Национального космического агентства Украины. Украина, Днепропетровск**ВЛИЯНИЕ НЕЖЕСТКОСТИ КОНСТРУКЦИИ АНТЕННЫ НА РАБОТУ ЕЕ ПРИВОДА С ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ****Анотація**

Запропоновано математичну модель одного каналу привода системи наведення нежорсткої антени. Досліджено вплив нежорсткості конструкції антени на роботу її привода з кроковим двигуном. Показано, що пружні коливання антени у ряді випадків можуть істотно вплинути на роботу її привода наведення.

Abstract

A mathematical model for a channel of flexible antenna drive mechanism is proposed. Affect of antenna structure flexibility on the stepping motor drive operation is investigated. It is shown that in some cases antenna flexible oscillations can affect essentially on the drive pointing mechanism operation.

Введение

В космической технике широко применяются различные антенны. Например, антенны используются для космической связи и решения задач радиоастрономии [1]. Перспективным направлением развития космической техники является создание космических солнечных электростанций. При этом одним из способов передачи энергии считается использование микроволнового луча, излучаемого передающей антенной [2].

Одной из задач, с которыми приходится сталкиваться при использовании космических антенн, является задача обеспечения ее пространственной ориентации. На практике такая задача решается с помощью системы наведения антенны (СНА).

Обычно система наведения антенны включает в свой состав бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ), устройство ввода-вывода, блок управления наведением антенны и привод. БЦВМ реализует алгоритм управления наведением антенны по данным расчета программных параметров о требуемых значениях углов наведения антенны и по информации о действительном положении антенны, полученной с помощью датчиков углов.

В ряде случаев при невысокой точности для СНА преобразование программной информации, рассчитанной в БЦВМ, в управляющую для при-

вода реализуется при позиционном управлении приводом.

В СНА часто используют приводы с шаговыми двигателями (ШД). Использование такого типа двигателей обуславливается следующими особенностями. Угол поворота ротора ШД определяется числом импульсов, которые поданы на двигатель. ШД обеспечивает полный момент в режиме остановки (если обмотки запитаны), прецизионное позиционирование и повторяемость. Хорошие ШД имеют точность 3–5% от величины шага и эта ошибка не накапливается от шага к шагу. Имеется возможность быстрого старта, остановки, реверсирования. Этим двигателям присуща высокая надежность, связанная с отсутствием щеток. Срок службы ШД фактически определяется сроком службы подшипников. Однозначная зависимость положения от входных импульсов обеспечивает позиционирование без обратной связи.

Однако ШД обладают и недостатками, к которым можно отнести следующее: возможная потеря контроля положения ввиду работы без обратной связи, а также явление резонанса.

Теоретические основы и особенности проектирования приводов с ШД изложены достаточно полно в работах [3–5], где отмечается необходимость выбора параметров привода с учетом особенностей нагрузки. Элементам конструкции антенн космического назначения могут быть присущи существенные упругие деформации, которые обусловлены возможными большими размерами и необходимостью снижения массы, выводимой на орбиту. Значительные упругие деформации конструкции могут привести к существенным дополнительным возмущениям, что может оказать негативное влияние на динамику привода и наведение антенны в целом. К сожалению, вопросы динамики приводов с ШД при учете нежесткости нагрузки не освещены в печати.

Учитывая отмеченное выше, целью настоящей статьи является изучение влияния нежесткости конструкции антенны на динамику привода с ШД.

Постановка задачи

Пространственная ориентация антенны часто осуществляется при помощи привода, который

представляет собой двухступенной карданов подвес с шаговыми двигателями. В настоящей статье для упрощения получения закономерностей влияния нежесткости конструкции антенны на работу привода будем рассматривать один его канал, кинематическая схема которого изображена на рис. 1. Звено 1 представляет собой внутреннюю рамку привода, ось вращения которой в рассматриваемом случае неподвижна относительно корпуса аппарата. Эта рамка вращается ШД (2) через редуктор (3), поворачивая антенну. В соответствии с работой [6] нежесткая антенна моделируется с помощью консольного стержня с массой на его конце.

Дополнительно будем считать, что скорость протекания электромагнитных процессов в ШД достаточно велика и запаздывание, обусловленное этими процессами, не учитывается. Редуктор привода не имеет люфта.

Будем использовать следующие системы координат:

$OXYZ$ — неподвижная относительно корпуса аппарата система координат, ось OX совпадает с осью вращения рамки 1, направления других осей системы показаны на рис. 1;

$Ox_c y_c z_c$ — связанная с рамкой 1 система координат, ось Ox_c совпадает с осью вращения рамки 1, направления других осей системы $Ox_c y_c z_c$ показаны на рис. 1.

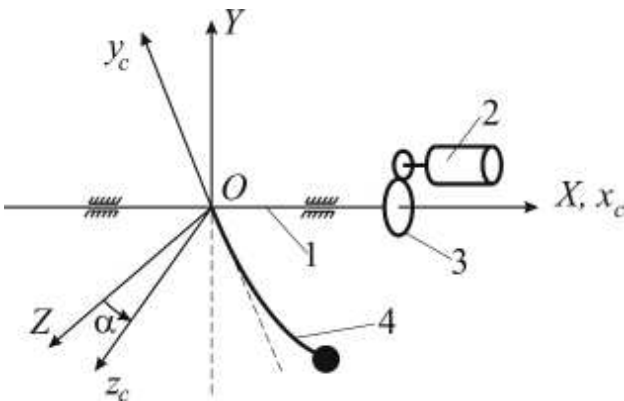


Рис. 1. Кинематическая схема одного канала привода антенны

В исходном состоянии положения осей систем координат $OXYZ$ и $Ox_c y_c z_c$ совпадают. Поворот рамки относительно системы $OXYZ$ определяется углом α .

Математическая модель

Согласно работе [4] движение привода без учета нежесткости антенны может быть описано дифференциальным уравнением второго порядка

с правой частью, включающей в свой состав ступенчатую функцию времени или числа команд:

$$(J_n + J_p) \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = M_m \sin p(\theta - \gamma) - D \frac{d\gamma}{dt} - M_n, \quad (1)$$

где J_n — момент инерции антенны, приведенный к валу ШД; J_p — момент инерции ротора ШД; γ — угол, характеризующий фактическое положение ротора ШД; θ — угол, определяющий дискретное программное положение ротора; M_m — амплитуда синхронизирующего момента ШД; p — число зубцов ротора; D — коэффициент демпфирования; M_n — момент, обусловленный нагрузкой привода.

Угол θ задается дискретно с помощью ступенчатой функции вида

$$\theta = \theta(N) = hN,$$

где h — величина шага угла поворота ротора ШД; $N = 0, 1, 2, \dots$

Коэффициент демпфирования может быть представлен в виде

$$D = d + \lambda,$$

где d — внутреннее электромагнитное демпфирование двигателя; λ — коэффициент вязкого трения.

Момент, обусловленный нагрузкой, запишем следующим образом:

$$M_n = M_T + M_y,$$

где M_T — момент сухого трения на валу ШД; M_y — момент, обусловленный упругими деформациями антенны.

Для случаев, когда $\dot{\gamma} \neq 0$, момент сухого трения определяется выражением

$$M_T = M_{Ta} + \text{sign} \dot{\gamma},$$

где M_{Ta} — амплитуда момента сухого трения.

В случае, когда $\dot{\gamma} = 0$, момент сухого трения находится следующим образом:

$$M_T = \begin{cases} -M_{Ta}, & \text{когда } M_m \sin p(\theta - \gamma) > M_{Ta} \\ M_m \sin p(\theta - \gamma), & \text{когда } |M_m \sin p(\theta - \gamma)| \leq M_{Ta} \\ M_{Ta}, & \text{когда } M_m \sin p(\theta - \gamma) < -M_{Ta} \end{cases}$$

В соответствии с работой [7] движение упругой конструкции антенны можно представить в виде движения несущего тела (недеформированная конструкция) и относительного движения носимых тел (частиц деформируемой конструкции), совершающих малые колебания около тех положений, которые они занимали бы в абсолютно твердом теле.

Учтем изгибные колебания антенны в плоскости вращения. Пренебрегая смещением центра масс и переменностью тензора инерции антенны за счет ее упругих колебаний, момент M_y может быть представлен в виде

$$M_y = \sum_{i=1}^n G_i \frac{d\dot{q}_i}{dt^2},$$

где G_i — коэффициент влияния вращательного движения нагрузки на упругие деформации антенны; q_i — обобщенная координата, характеризующая упругие колебания антенны в плоскости вращения; i — номер формы колебаний антенны.

Выражение для коэффициента влияния G_i в соответствии с [7] может быть записано следующим образом:

$$G_i = (m_c n_i + m_r n_i^r) y_0 - (m_c d_i + m_r d_i^r) l,$$

где m_c — масса стержня; m_r — масса груза; l — длина стержня; y_0 — координата точки крепления стержня в системе координат $Ox_c y_c z_c$. Коэффициенты n_i , n_i^r , d_i определяются выражениями

$$n_i = \int_0^1 \varphi_i(s) ds; n_i^r = \varphi_i(1); d_i = \int_0^1 s \varphi_i(s) ds.$$

Здесь $\varphi_i(s)$ — выражение для формы собственных колебаний; s — безразмерный параметр равный

$$s = \frac{y}{l},$$

где y — координата произвольной точки стержня в системе координат $Ox_c y_c z_c$.

Уравнение (1) необходимо дополнить уравнениями относительного движения для обобщенных координат q_i , которые запишем следующим образом:

$$G_i \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + m \frac{d^2 q_i}{dt^2} + \varepsilon_i \frac{dq_i}{dt} + c_i q_i = 0, i = 1, \dots, n$$

где ε_i — коэффициенты демпфирования; c_i — коэффициенты жесткости.

Угол поворота антенны определяется выражением

$$\alpha = n\gamma,$$

где n — величина, обратная передаточному отношению редуктора.

Моделирование

При моделировании движения ШД и нагрузки будем использовать следующие исходные данные: $J_n = 0,347$ кгм²; $J_p = 0,7 \cdot 10^{-6}$ кгм²; $m = 2,0$ кг; $n = 2,899 \cdot 10^{-3}$; $M_m = 8,5 \cdot 10^{-2}$ Нм; $p = 30$; $M_T = 3,0 \cdot 10^{-3}$ Нм; $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-3}$ Нмс²; $h = 5,24 \cdot 10^{-2}$ рад.

При моделировании будем учитывать только первую форму упругих колебаний антенны. Рассмотрим расчетные случаи, когда частоты f_1 этих колебаний равны 50, 100, 120, 300, 500 Гц.

На рис. 2–7 изображены зависимости угла поворота антенны от времени. Тонкой линией показана зависимость, соответствующая случаю

идеального дискретного изменения положения антенны в моменты подачи управляющих импульсов. Жирной линией показана зависимость положения антенны от времени, построенная по результатам моделирования.

На рис. 2 показана кривая, полученная без учета упругости антенны. Как видно из этого

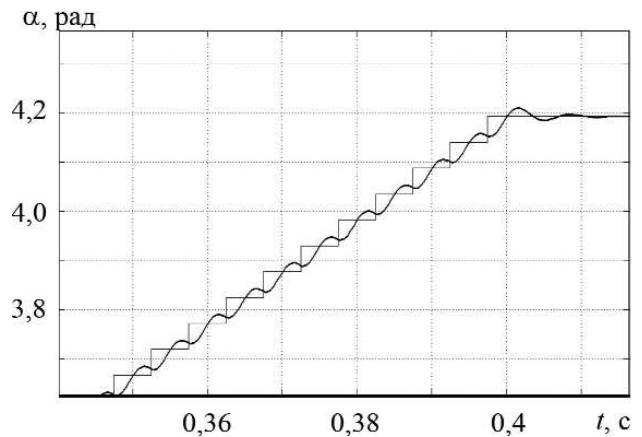


Рис. 2. Зависимость угла поворота абсолютно жесткой антенны от времени

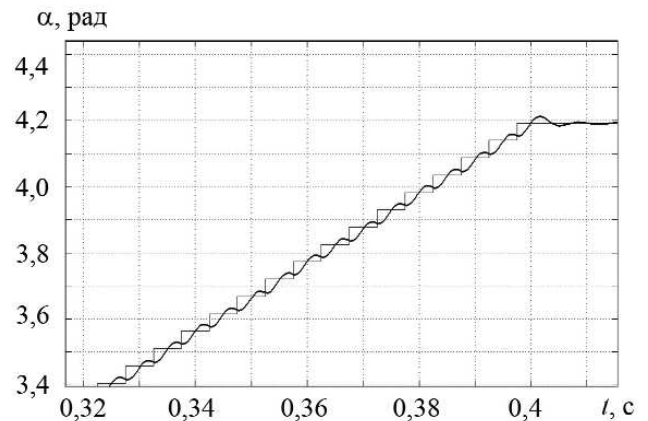


Рис. 3. Зависимость угла поворота упругой антенны от времени ($f_1 = 50$ Гц)

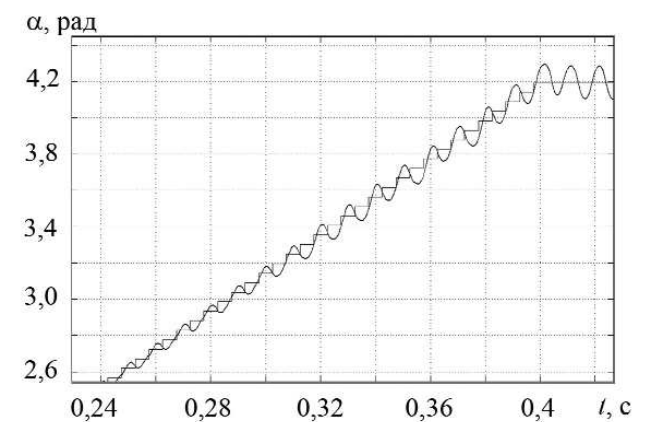


Рис. 4. Зависимость угла поворота упругой антенны от времени ($f_1 = 100$ Гц)

рисунка, антенна при движении совершает вынужденные колебания. Частота этих колебаний зависит как от собственной частоты привода, так и от частоты следования управляющих импульсов. После прекращения подачи управляющих импульсов эти колебания быстро затухают.

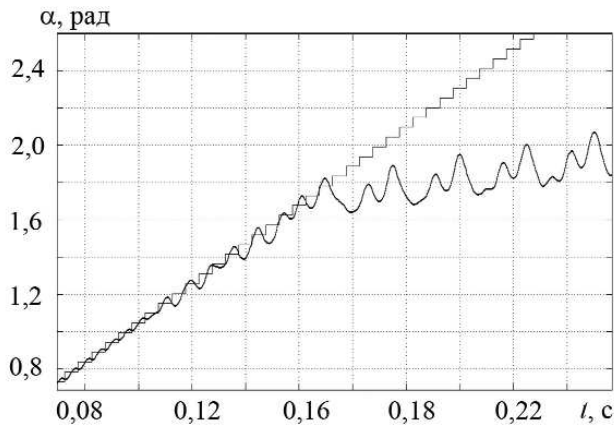


Рис. 5. Зависимость угла поворота упругой антенны от времени ($f_1 = 120$ Гц)

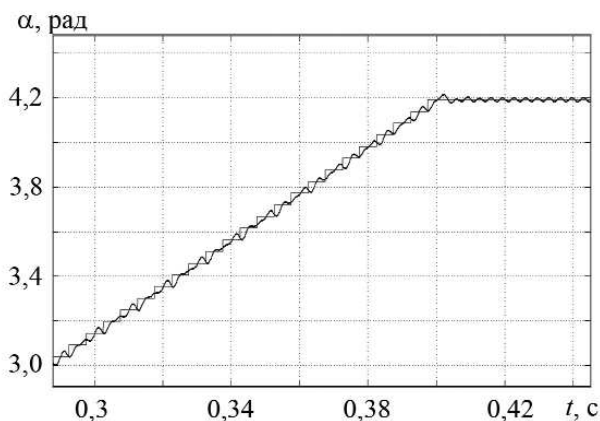


Рис. 6. Зависимость угла поворота упругой антенны от времени ($f_1 = 300$ Гц)

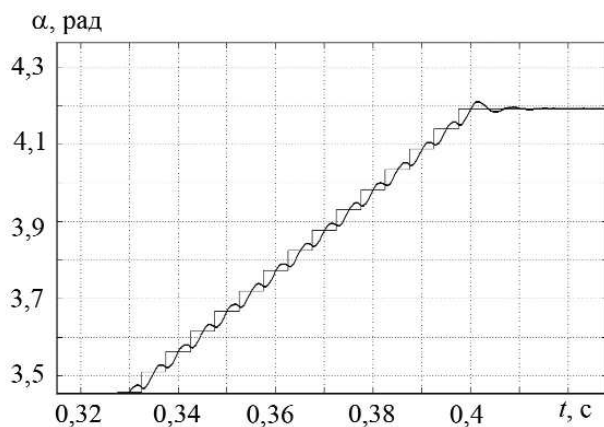


Рис. 7. Зависимость угла поворота упругой антенны от времени ($f_1 = 500$ Гц)

На рис. 3–7 показаны кривые, построенные с учетом одного тона упругих колебаний антенны. Из этих рисунков видно, что влияние упругости антенны увеличивается по мере приближения частот ее собственных колебаний к частоте вынужденных колебаний ротора ШД. Так на рис. 4 можно видеть монотонное увеличение амплитуды вынужденных колебаний антенны, вызванных ее упругими деформациями. На рис. 5 изображен расчетный случай, когда упругость антенны приводит к выпадению ротора ШД из синхронизма.

Заключение

Таким образом, в настоящей статье проведен анализ углового движения упругой антенны и ее привода с шаговым двигателем. Показано, что упругие колебания антенны могут оказать существенное влияние на работу привода, вплоть до потери устойчивости его движения. Следовательно, разработке таких приводов для устройств, которым характерны значительные упругие деформации, должен предшествовать тщательный анализ частот их собственных колебаний.

Результаты настоящей статьи указывают на необходимость разработки методики анализа устойчивости привода антенны с учетом ее собственных динамических характеристик. Кроме того, целесообразно также изучить возможное взаимовлияние каналов управления для реального привода с ШД. Работы в этих направлениях являются предметом дальнейших исследований.

Литература

1. *Белянский П.В., Сергеев Б.Г.* Управление наземными антеннами и радиотелескопами. — М.: Сов. радио, 1980. — 280 с.
2. *Ванке В.А., Лесков Л.В., Лукьянов А.В.* Космические энергосистемы. — М.: Машиностроение, 1990. — 144 с.
3. *Ратмиров В.А., Ивоботенко Б.А.* Шаговые двигатели для систем автоматического управления, М. — Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 128 с.
4. *Дискретный электропривод с шаговыми двигателями.* Под редакцией Чиликина М.Г. — М.: Энергия, 1971. — 624 с.
5. *Шевелев В.И.* Системы регулирования с несколькими шаговыми двигателями. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 72 с.
6. *Kawakami Y., Hiroshi H., Maszumi U.* Design of an on-board antenna pointing control system for communication satellites // AIAA/AAS Astrodynamics Conference // (Aug 15–17, 1988, Washington, DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics). — 1988. — P. 689–694.
7. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. — М.: Физматгиз, 1961. — 824 с.