

Рисунок 3 – Процесс стабилизации угловой скорости МКА при начальной закрутке 67 °/с

Заключение. Дано описание системы ориентации малого космического аппарата с волновым твердотельным гироскопом в контуре управления и двигателем-маховиком в качестве органа управления. Иллюстрируется процесс гашения угловой скорости МКА при его начальной закрутке.

УДК 531.385

ДИНАМИКА КАНАЛА ВЫСОТЫ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

Малютин Д.М.¹, Адякин Ю.Н.²

¹ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

²ПАО «НПО «Стрела» Тула, Российская Федерация

Аннотация. В работе приведены математическая модель канала высоты опорно-поворотного устройства, закон изменения сигнала задатчика, структура построения усилительно-преобразующего тракта и результаты исследования динамики этого канала.

Ключевые слова: следящая система, двигатель, редуктор, опорно-поворотное устройство.

DYNAMICS OF THE CHANNEL OF HEIGHT ROTARY DEVICE

Malyutin D.¹, Adjakin J.²

¹Tula state university

²PJSC «SPA «Strela»

Tula, Russian Federation

The summary. In work the mathematical model of the channel of height of the rotary device, the law of change of a signal, structure of construction path and results of research of dynamics changes of this channel are resulted.

Keywords: watching system, the engine, a reducer, the rotary device.

Адрес для переписки: Малютин Д.М., пр. Ленина 92, Тула 300002, Российская Федерация
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Опорно-поворотные устройства (ОПУ) предназначены для дистанционного изменения направления оптической оси телевизионной системы с изменяемой скоростью по командам оператора в двух плоскостях (вертикальной и горизонтальной), а также управления углом обзора и фокусировкой видеокамеры [1–4]. Также ОПУ широко применяются в радиолокации для дистанционного управления положением антенн радиолокационных станций (РЛС). Если азимутальный канал ОПУ может быть реализован по классической схеме следящей системы [4], то при работе

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)».

Литература

1. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором: монография / В. Я. Распопов [и др.] : под ред. В. Я. Распопова. – Тула: ТулГУ, 2018. – 189 с.
2. Летные испытания алгоритмов управления ориентацией микроспутника «Чибис-М» / Д. С. Иванов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2012. – № 58. – 32 с.
3. Федосеев, В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – М.: Логос, 2007. – 248 с.
4. Ивандиков, Я. М. Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов / Я. М. Ивандиков. – М. Машиностроение, 1979. – 208 с.

вертикального канала имеются особенности, обусловленные тем, что центр масс нагрузки находится выше оси вращения. В системе присутствует верхняя маятниковость. Целью работы является разработка математической модели вертикального канала ОПУ, разработка закона изменения сигнала задатчика и структуры построения усилительно-преобразующего тракта, обеспечивающих высокую точность перемещения и скорость управления нагрузки.

Математическую модель канала высоты ОПУ представим в виде:

$$\begin{cases} \Delta U = U_\beta - U_{oc} \\ U_\beta = K_1 \cdot \beta \\ U_{oc} = \varphi_e \cdot K_{oc} \cdot W_\phi(p) \\ U = W_{kc}(p) \cdot K_{yнт} \cdot \Delta U \\ L_\alpha \cdot \dot{i}_\alpha + i_\alpha \cdot R_\alpha + i C_e \cdot \dot{\varphi}_e = U \\ J_e \cdot \ddot{\varphi}_e = C_m \cdot i_\alpha i - b \cdot \dot{\varphi}_e - M_{mp} + \\ + mgl \sin \varphi_e, \end{cases} \quad (1)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; U – напряжение на управляющей обмотке исполнительного двигателя; ΔU – напряжение сигнала ошибки; U_β – напряжение с выхода задающего устройства канала высоты; U_{oc} – напряжение с выхода устройства обратной связи; L_α – индуктивность якорной цепи; C_m – коэффициент пропорциональности между током якоря и вращающим моментом; R_α – сопротивление обмотки якоря; C_e – коэффициент пропорциональности между скоростью вращения и обратной э.д.с.; J_e – суммарный момент инерции на валу исполнительного двигателя канала высоты; $W_{kc}(p)$ – передаточная функция корректирующего устройства прямой цепи; $W_\phi(p)$ – передаточная функция корректирующего устройства цепи обратной связи; β – сигнал с выхода задающего устройства (ЗУ) канала высоты; φ_e – угол поворота нагрузки по каналу высоты (угол места); $\dot{\varphi}_e$ – угловая скорость нагрузки по каналу высоты; K_1 – коэффициент передачи задатчика; K_{oc} – коэффициент передачи усилительно-преобразующего тракта цепи обратной связи; b_e – коэффициент вязкого трения в опорах подвеса; $K_{yнт}$ – коэффициент передачи усилительно-преобразующего тракта в прямой цепи; M_{mp} – момент сил сухого трения; $M_{mp\alpha}$ – амплитуда момента сил сухого трения по оси канала высоты; i – коэффициент передачи редуктора по каналу высоты; m – масса нагрузки, g – ускорение силы тяжести; l – расстояние от центра масс нагрузки до оси вращения канала высоты.

Структурная схема канала высоты ОПУ представлена на рис. 1.

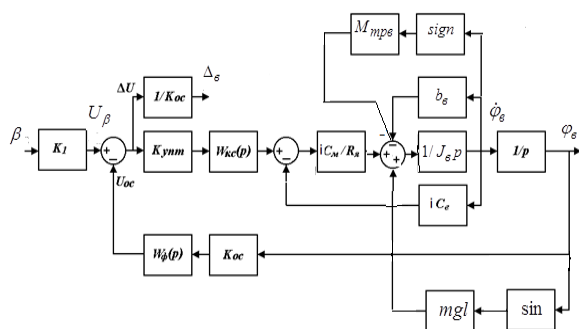


Рисунок 1 – Структурная схема канала высоты ОПУ:
 Δ_e – погрешность отработки заданного углового положения нагрузки по углу места

Динамические характеристики ОПУ по каналу высоты. Исследование динамики канала высоты ОПУ проведем при следующих численных значениях параметров структурной схемы: $\dot{i} = 85$, $M_{mp\alpha} = 1$ Нм, $J_e = 1,2$ кгм², $m = 11$ кг, $l = 0,26$ м, $b_e = 0,001$ Нмс.

Параметры исполнительного двигателя: $R_\alpha = 18$ Ом, $c_m = 0,107$ Нм/А, $c_e = 0,26$ Вс/рад; $i c_m / R_\alpha = 0,505$; $i c_e = 21,9$; $U = 35$ В.

Методом ЛАФЧХ определены численные значения параметров усилительно-преобразующего тракта, обеспечивающие устойчивый режим работы системы и требуемые динамические характеристики. В прямой цепи системы предлагается использовать корректирующее устройство с передаточной функцией $W_{kc}(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{p(T_3 p + 1)}$, а в цепи обратной связи корректирующее устройство с передаточной функцией $W_\phi(p) = 1$. Такая комбинация корректирующих устройств позволяет обеспечить устойчивость системы, а так же астатизм первого порядка передаточной функции, являющейся отношением угла поворота ОПУ по оси высоты к сигналу задатчика. При $K_{yнт} = 800$, $T_1 = 0,4$ с, $T_2 = 0,1$ с, $T_3 = 0,01$ с, $K_{oc} = 10$ в системе на частоте среза 82,5 рад/с обеспечен запас по фазе 47 град. Полоса пропускания ЛАФЧХ замкнутой системы по передаточной функции, являющейся отношением угла поворота нагрузки по каналу высоты к сигналу задатчика, составляет 136 рад/с. В установившемся режиме погрешность отработки сигнала задатчика равна нулю. Разработана имитационная модель замкнутой системы по каналу высоты. В имитационной модели дополнительно учтены нелинейности, обусловленные ограничением по моменту исполнительного двигателя и действием момента сил сухого трения. Кроме того, конструкция ОПУ выполнена таким образом, что при нулевом значении угла места центр масс нагрузки оказывается смещенным на угол $-0,13$ рад относительно вертикали. Это конструктивное решение позволяет уменьшить момент от верхней маятниковости устройства во всем диапазоне углов поворота. В имитационной модели замкнутой системы дополнительно учтен к.п.д. волнового редуктора. Разработанная имитационная модель путем решения сложной нелинейной системы дифференциальных уравнений позволяет визуализировать форму сигнала задатчика, рассчитать процесс программного разворота нагрузки на заданный угол, рассчитать процесс изменения угловой скорости разворота нагрузки на заданный угол, рассчитать процесс изменения углового ускорения разворота нагрузки на заданный угол, рассчитать процесс изменения напряжения управления на исполнительном двигателе, рассчитать процесс изменения тока управления на исполнительном двигателе, рассчитать потребляемую мощность, рассчитать процесс изменения момента, создаваемого

исполнительным двигателем, рассчитать погрешность отработки сигнала задатчика.

При функционировании ОПУ закон изменения сигнала задатчика существенно влияет на динамические характеристики системы. Расчеты показывают, что задание требуемого угла поворота в виде ступенчатого воздействия, что казалось бы, обеспечивает максимальное быстродействие системы приводит к нарушению устойчивости нелинейной системы. Оптимальным является задание требуемого угла поворота в виде линейно нарастающего значения до требуемого значения угла поворота.

Заданный закон управления обеспечивает поворот нагрузки по каналу высоты от начального значения угла $-0,09$ рад к углу $0,4$ рад и далее от угла $0,4$ рад к углу $-0,05$ рад (рис. 2) с перерегулированием не превышающем $2,5\%$. Крутизна нарастания и спада сигнала задатчика составляет $0,3$ рад/с. Увеличение крутизны сигнала задатчика приводит к уменьшению времени переходного процесса, однако при этом возрастает перерегулирование в процессе поворота антенны на заданный угол. Поворот антенны по каналу высоты происходит с угловой скоростью, график которой приведен на рис. 3. Из графика (рис. 3.) следует, что в начальный момент времени угловая скорость поворота достигает значения $0,48$ рад/с и, затем в процессе поворота, поддерживается постоянное значение угловой скорости $0,3$ рад/с. График погрешности отработки сигнала задатчика представлен на рис. 4. К моменту времени $2,5$ с погрешность не превышает $0,03$ град, а в установившемся режиме отсутствует. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что в процессе работы обеспечивается длительный режим работы двигателя без перегрева. Система двигатель – волновой редуктор развивает момент, достигающий значения 17 Нм. Это значение находится в пределах линейной зоны характеристики системы двигатель-редуктор. Потребляемая мощность в моменте достигает 68 Вт.

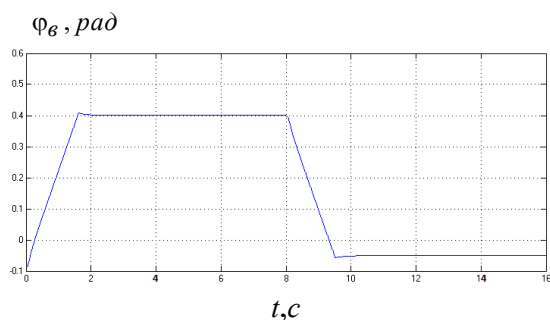


Рисунок 2 – Угол поворота нагрузки по каналу высоты (угол места)

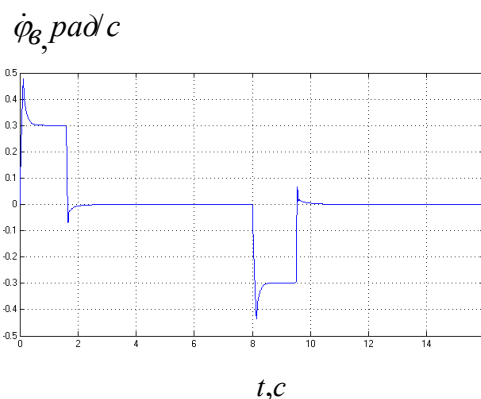


Рисунок 3 – Угловая скорость поворота нагрузки по каналу высоты

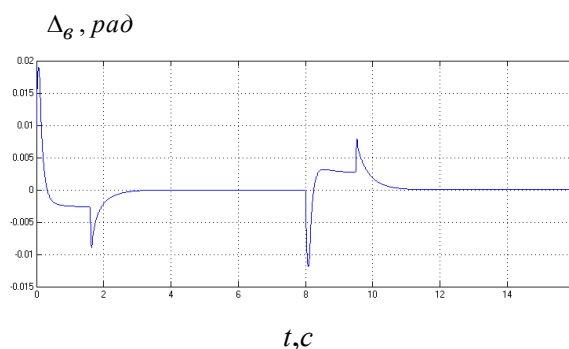


Рисунок 4 – Погрешность отработки сигнала задатчика

Заключение. Реализация предложенных в работе закона изменения сигнала задатчика и структуры построения усилительно-преобразующего тракта ОПУ позволяют обеспечить высокие скорости и точностные характеристики перемещения нагрузки на заданный угол.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Тульской области в сфере науки и техники. Договор ДС/143 от 26 июля 2022 г.

Литература

1. Поворотное устройство для камеры наружного наблюдения : пат. РФ № 2345501 / А. Ю. Мостовой. – Оpubл. 2006.
2. Распопов, В. Я. Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления / В. Я. Распопов, Д. М. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 372–386.
3. РЛС «Фара-ВР» – качественный скачок в развитии радиолокационной техники // Национальная оборона (электронный журнал). – 2021. – № 8.
4. Малютин, Д. М. Исследование динамики системы стабилизации оптической оси / Д. М. Малютин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2003. – Т. 46, № 9. – С. 49–53.