

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Выпуск 6 (25) 2014 ноябрь – декабрь <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-6-14>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN614.pdf>

DOI: 10.15862/66TVN614 (<http://dx.doi.org/10.15862/66TVN614>)

УДК 62-187.4

Нигматуллина Фарида Расимовна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Россия, Санкт-Петербург¹

Аспирант

E-Mail: farida_17@mail.ru

Терешин Валерий Алексеевич

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Россия, Санкт-Петербург

Доцент, кандидат технических наук

E-Mail: terva@mail.ru

Динамические ошибки трехосного телескопа в режиме сопровождения

¹ 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Аннотация: В статье рассмотрены возможности контурного управления трехосным механизмом телескопа, точность его позиционирования и динамические характеристики.

Определены области устойчивости системы управления с обратной связью со звена и с двигателя. Исследованы динамические характеристики телескопа в двух режимах работы при сопровождении искусственного спутника земли в нескольких точках области устойчивости при разных углах наклона орбиты.

Составлены уравнения движения для описания динамических процессов в многодвигательной управляемой машине с пространственным механизмом.

В работе показано, что при описании динамических процессов происходящих в каждом модуле, необходимо учитывать влияние других приводов. Взаимное влияние динамических ошибок между приводами практически полностью отсутствует.

Проведен сравнительный анализ минимально достижимых динамических ошибок при охвате обратными связями двигателя и функционального звена. Сравнительный анализ показал нецелесообразность использования датчиков положения функциональных звеньев для формирования сигналов обратных связей при сопровождении объектов, движущихся по орбите. Организация обратной связи по положению роторов двигателей обеспечивает более точное сопровождение космических объектов. Однако, при использовании телескопов для слежения за маневрирующими объектами охват обратной связью упругого-диссипативного передаточного механизма может оказаться необходимым.

Ключевые слова: динамический анализ механизмов; трехосный телескоп; динамические ошибки; точность наведения телескопа; управление телескопом; опорно - поворотное устройство.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Динамические ошибки трехосного телескопа в режиме сопровождения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6 <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN614.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/66TVN614

В настоящее время одним из самых приоритетных вопросов в науке является изучение космического пространства, что способствует развитию как новых, так и спроектированных ранее систем контроля космического пространства (СККП). Являясь одной из главных составных частей воздушно-космической обороны СККП объединяет возможности всех средств военных и гражданских ведомств. Она предназначена для глобальной оценки космической обстановки как в военное, так и в мирное время. Развитие СККП начинается с момента начала космической эры и запуска первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года. Тогда и возник вопрос об острой необходимости постоянного наблюдения и контроля за космическими объектами, а также разработки необходимых средств наблюдения, которые могли бы обеспечить полноценную космическую деятельность. Количество летающих вокруг Земли объектов искусственного происхождения за последние десятилетия стремительно увеличивается. Основным недостатком интенсивного освоения космоса является увеличение количества «космического мусора», представляющего реальную угрозу для действующих ИСЗ.

С 1975 года началось строительство высокоточных оптико-электронных центров контроля космического пространства, способных обрабатывать большой поток оптической и радиолокационной информации. Одновременно с этим резко возросла необходимость увеличения точности определения параметров орбит космических объектов, их положения, скорости движения и траектории. Основными задачами контроля космического пространства являются:

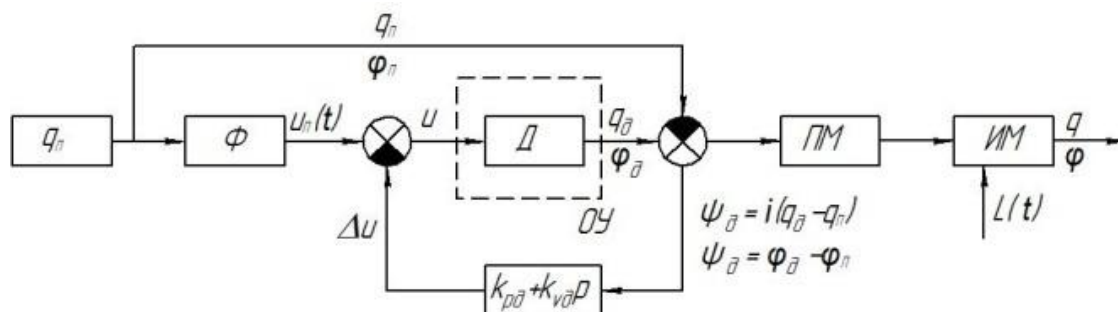
- своевременная передача информации в соответствующие органы государственного управления;
- оценка других опасностей, связанных с засорением космического пространства;
- непрерывное наблюдение за космической обстановкой;
- ведение радиотехнической разведки с целью своевременного предотвращения угроз.

Для наблюдения за космическими объектами проектируются новые телескопы как наземного, так и космического базирования. С экономической точки зрения для решения выше поставленных задач так же выгодна модернизация и технологическая доработка созданных ранее СККП. Для наблюдения за низкоорбитальными спутниками невозможно использовать телескопы космического базирования, которые в основном наблюдают за наземными объектами [1,2], в то время как оптические телескопы наземного базирования могут обеспечить полный спектр наблюдений за объектами данного типа. Известны различные комплексы с телескопами, а также отдельные телескопы расположенные по всему миру для наблюдения за космическими объектами, такие как радиооптический комплекс «Крона», Телескоп Hobby-Eberly Мак-Дональдской обсерватории, оптический комплекс Мауна-Кеа, телескопы системы EOS, Большой азимутальный телескоп и другие [3,4]. В работе исследуется трехосный телескоп системы контроля космического пространства «Окно» [5], который сейчас модернизируется. Опорно-поворотное устройство телескопа, является уникальным узлом системы, которое для обеспечения жестко заданных характеристик по скорости и точности вращения выполнено на гидростатических опорах, обеспечивающих минимальное трение при достаточно большой грузоподъемности.

Целью данной работы является исследование динамических ошибок телескопа для создания адаптированных методов кинематического и динамического анализа трехосных механизмов, а также разработка методики выбора параметров для уменьшения погрешности наведения телескопа.

Общий вид телескопа, кинематическая схема и уравнения, связывающие законы движения с движущими моментами, представлены в [6]. Для оценки динамических процессов с помощью компьютерного моделирования необходимо задаться каким-либо законом программного движения $q_{II}(t)$. В качестве такого закона в первом приближении в работе принято равномерное движение спутника по круговой орбите на высоте 400 км. Законы программного движения представлены в [7]. В работе [8] приведены исследования динамики движения телескопа, обоснование целесообразности применения для разных орбит различных пар приводов (1-2, 2-3), определение возмущающих и крутящих моментов, структурная схема и зависимость динамических ошибок от угла наклона орбиты в области устойчивости при обратной связи, охватывающей звено.

На рис.1 представлена структурная схема исследуемой системы управления, с обратной связью, снимаемой с двигателя [10].



ПМ – передаточный механизм; ИМ – исполнительный механизм; Д – двигатель; Ф – блок формирования программного управления; ОУ – объект управления; i – передаточное число редуктора; $k_{v\delta}p + k_{p\delta}$ – передаточная функция цепи обратной связи; p – оператор дифференцирования по времени; ψ_{δ} – динамические ошибки

Рис.1. Структурная схема системы управления модулем
 (составлено автором)

Движение модуля описывается системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} I_p \ddot{\varphi}_\delta &= M_\delta + c(\varphi - \varphi_\delta) + b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_\delta) \\ I \ddot{\varphi} &= -c(\varphi - \varphi_\delta) - b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_\delta) + L(t) \\ \tau \dot{M}_\delta + M_\delta &= -s\dot{\varphi}_\delta + ru \end{aligned} \right\}$$

где τ , s и r – собственная постоянная времени, крутизна статической (механической) характеристики двигателя и коэффициент пропорциональности; u – управляющий сигнал на двигателе; u_{II} – закон программного управления; Δu – сигнал отрицательной обратной связи; I_p, I – моменты инерции ротора двигателя и звена; M_δ – момент электромагнитных сил, приложенный к ротору двигателя; φ_δ, φ – угол поворота ротора двигателя и приведенный к

нему угол поворота звена; c и b – жесткость и коэффициент демпфирования редуктора; $L(t)$ – возмущающий момент. Эту систему в преобразованиях Лапласа можно представить в матричной форме [9]:

$$\begin{bmatrix} I_p p^2 + bp + c & -(bp + c) & -1 \\ -(bp + c) & Ip^2 + bp + c & 0 \\ sp + r(k_{v\delta} p + k_{p\delta}) & r(k_v p + k_p) & \tau p + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_\delta \\ \Psi \\ M \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -I_p [(p^2 \Phi_{II}(p) - p\varphi_\delta(0) - \dot{\varphi}_\delta(0)] + b[\varphi_\delta(0) - \varphi(0)] \\ -\frac{Q(p)}{i} - b[\varphi_\delta(0) - \varphi(0)] + I[p\varphi(0) + \dot{\varphi}(0) - p\varphi_{II}(0) - \dot{\varphi}_{II}(0)] \\ \tau M_\delta(0) - s\varphi_{II}(0) + s\varphi_\delta(0) + rk_v \varphi(0) + rk_{v\delta} \varphi_\delta(0) - rk_v \varphi_{II}(0) - rk_{v\delta} \varphi_{II}(0) \end{bmatrix}$$

где Q – движущий момент на выходе передаточного механизма, определяемый с помощью уравнения Лагранжа второго рода

$$Q_j = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j}, \quad j = 1, 2, 3$$

Для анализа взаимовлияния динамических ошибок различных модулей можно линеаризовать правую часть данного матричного уравнения около программного движения. Таким образом уравнения движения приобретают вид системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений с медленно меняющимися коэффициентами. В силу того, что эти коэффициенты меняются значительно медленнее общего решения однородного дифференциального уравнения и за расчетное время изменяются незначительно, то для интегрирования системы можно использовать метод замороженных коэффициентов. Вышеприведенные рассуждения можно распространить и на область устойчивости, которая при этом так же будет медленно изменяться. Для обоснования этого после выполнения всех расчетов необходимо оценить количественно слагаемые содержащие динамические ошибки в выражении для движущего момента Q .

Рассмотрим Q_1 в режиме 1-2 и оценим влияние на него динамических ошибок второго привода.

$$Q_1 \left(q_{II} + \frac{\psi}{i} \right) = Q_1(q_{II}) + \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial q_2} \frac{\psi_2}{i} + \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial \dot{q}_2} \frac{\dot{\psi}_2}{i} + \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial \ddot{q}_2} \frac{\ddot{\psi}_2}{i} + \dots$$

Многоточие соответствует слагаемым содержащим динамические ошибки первого привода. Оценим сверху влияние динамических ошибок второго привода и докажем их малость с помощью неравенства

$$\begin{aligned} & \max_t \left| \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial q_2} / Q_1(q_{II}) \right| \frac{\max_t |\psi_2(t)|}{i} + \max_t \left| \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial \dot{q}_2} / Q_1(q_{II}) \right| \frac{\max_t |\dot{\psi}_2(t)|}{i} + \\ & + \max_t \left| \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial \ddot{q}_2} / Q_1(q_{II}) \right| \frac{\max_t |\ddot{\psi}_2(t)|}{i} \ll 1 \end{aligned}$$

Частные производные от Q_1 определим на вышеприведённом программном движении при $\alpha = 10^\circ$. Расчеты показали, что неравенства

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial q_2} / Q_1(q_{II}) \right| < 4; & \quad \left| \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial \dot{q}_2} / Q_1(q_{II}) \right| < 10^3, \\ \left| \frac{\partial Q_1(q_{II})}{\partial \ddot{q}_2} / Q_1(q_{II}) \right| < 4 \times 10^4 \end{aligned}$$

нарушаются в течение не более 1 секунды.

С помощью уравнений движения представленных в матричном виде найдем решение $\psi_2(t)$ на том же программном движении при коэффициентах обратных связей $k_v = 0.09, k_p = 15$ и определим

$$\frac{\max_t |\psi_2(t)|}{i} = 8,4 \times 10^{-11}, \quad \frac{\max_t |\dot{\psi}_2(t)|}{i} = 1 \times 10^{-12}, \quad \frac{\max_t |\ddot{\psi}_2(t)|}{i} = 1,85 \times 10^{-14}.$$

Тогда исследуемое неравенство примет следующий численный вид

$$4 \times (8,4 \times 10^{-11}) + 10^3 \times (1 \times 10^{-12}) + 4 \times 10^4 \times (1,85 \times 10^{-14}) \ll 1$$

Таким образом мы численно показали, что слагаемое определяющее влияние ошибок второго привода на ошибки первого в режиме 1-2 пренебрежимо мало по сравнению с $Q_1(q_{II})$.

Из сказанного выше следует, что на рассматриваемых программных движениях матрица уравнений одновременного движения двух приводов практически является блочно-диагональной и имеет следующий вид

$$\begin{bmatrix} I_{p1}p^2 + b_1p + c_1 & -(b_1p + c_1) & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -(b_1p + c_1) & I_{p1}p^2 + b_1p + c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_1p + r_1(k_{v01}p + k_{p01}) & r_1(k_{v1}p + k_{p1}) & \tau_1p + 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{p2}p^2 + b_2p + c_2 & -(b_2p + c_2) & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -(b_2p + c_2) & I_{p2}p^2 + b_2p + c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_2p + r_2(k_{v02}p + k_{p02}) & r_2(k_{v2}p + k_{p2}) & \tau_2p + 1 \end{bmatrix}$$

Это исследование доказывает отсутствие взаимовлияния динамических ошибок модулей. Взаимовлияние модулей на программном движении конечно существует.

Проведено исследование системы уравнений движения модуля на устойчивость при охвате обратной связью передаточного механизма [8] и двигателя (рис.2).

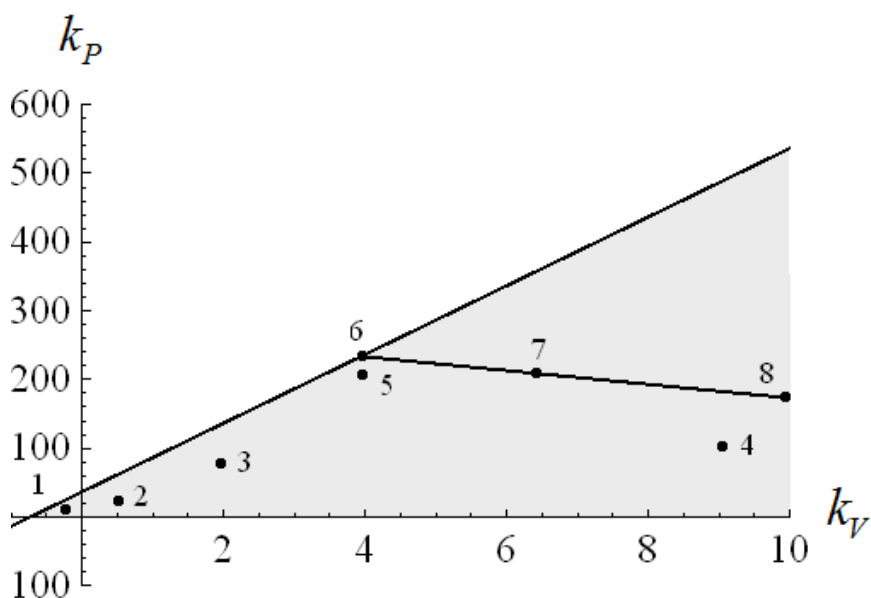


Рис. 2. Область устойчивости в режиме сопровождения при охвате обратной связью двигателя (составлено автором)

На рис.2 линия, проходящая через точки 6,7,8 соответствует допустимым значениям максимального управляющего электрического напряжения на двигателе.

Далее исследованы динамические характеристики телескопа в двух режимах работы (1-2, 2-3) при сопровождении искусственного спутника земли. Изучены его динамические свойства в нескольких точках области устойчивости. На рис.3 и 4 показаны динамические ошибки на двигателе и звене при разных углах наклона орбиты, как при обратной связи охватывающей звено, так и двигатель. Исследование свойств динамических ошибок как функций времени было выполнено на основе уравнений движения в матричном виде после взятия обратного преобразования Лапласа.

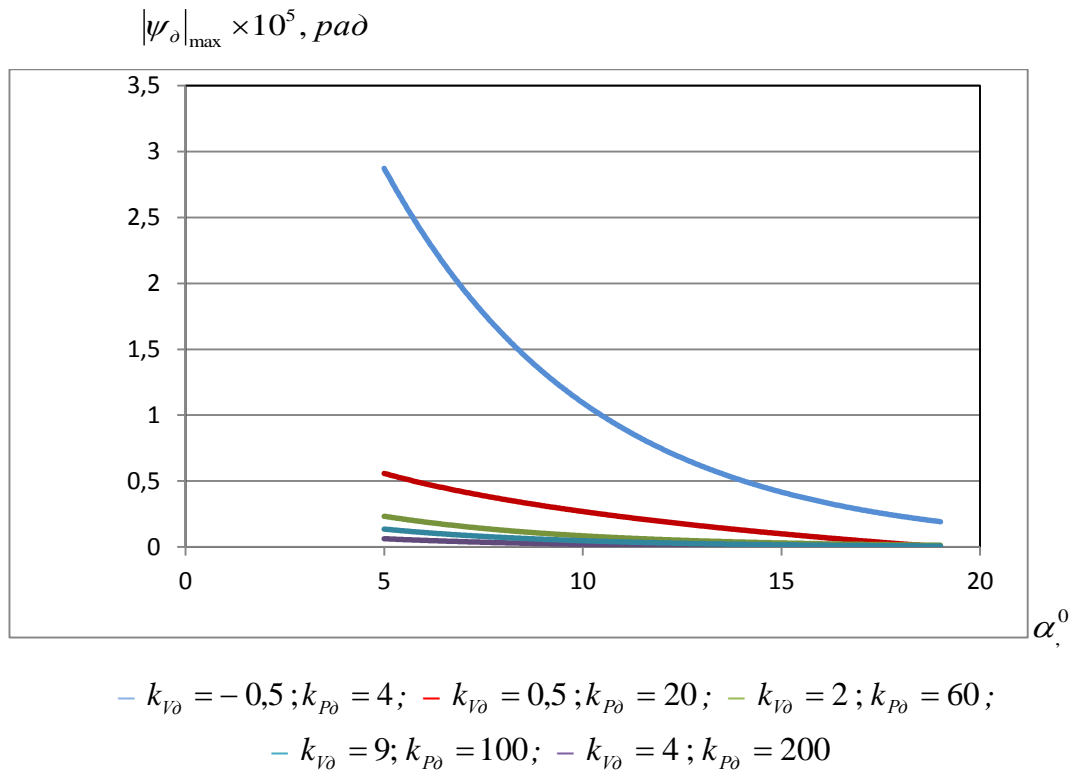


Рис. 3. Зависимость динамических ошибок на двигателе от угла наклона орбиты при различных коэффициентах обратной связи на первом модуле. Динамические ошибки на двигателе приведены к звену (составлено автором)

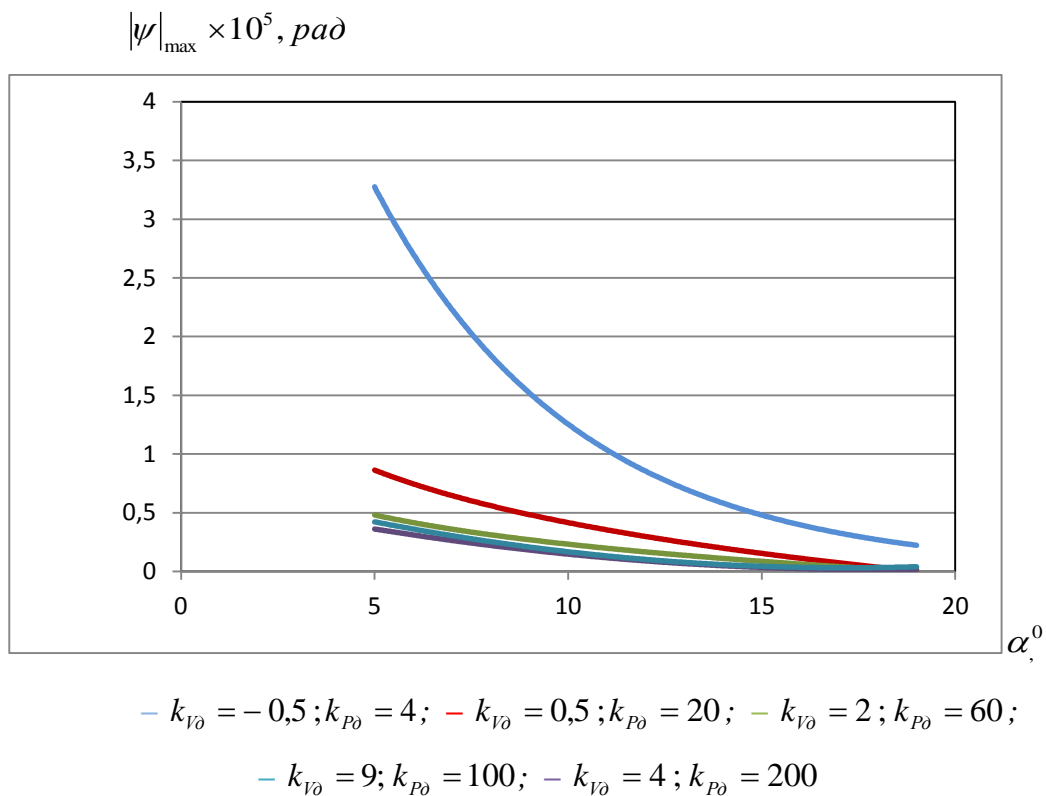


Рис. 4. Зависимость динамических ошибок звена от угла наклона орбиты при различных коэффициентах обратной связи на первом модуле (составлено автором)

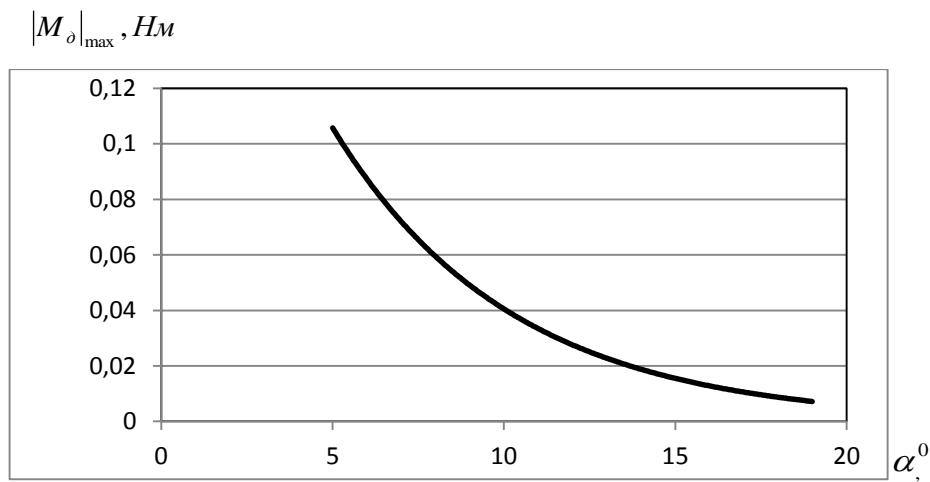


Рис. 5. Зависимость движущего момента на двигателе первого модуля от угла наклона орбиты (составлено автором)

Исследована зависимость динамических ошибок, движущих моментов и сигналов отрицательной обратной связи от времени при $k_v = 0,05$, $k_p = 10$, $\alpha = 10^\circ$ (рис.6).

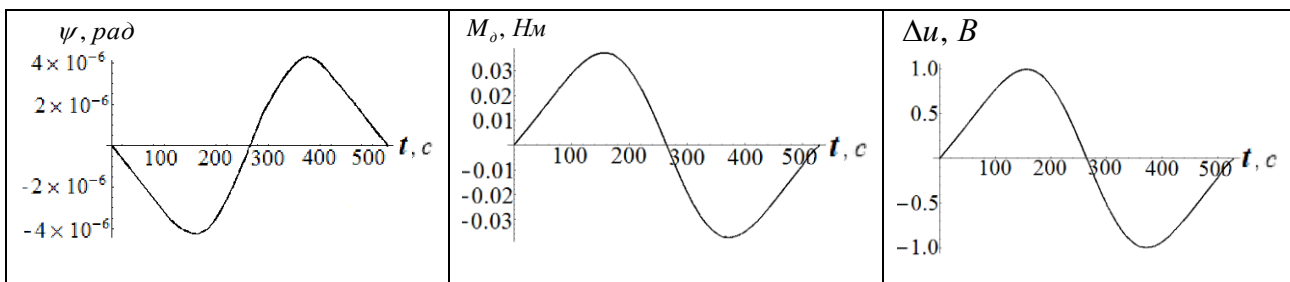
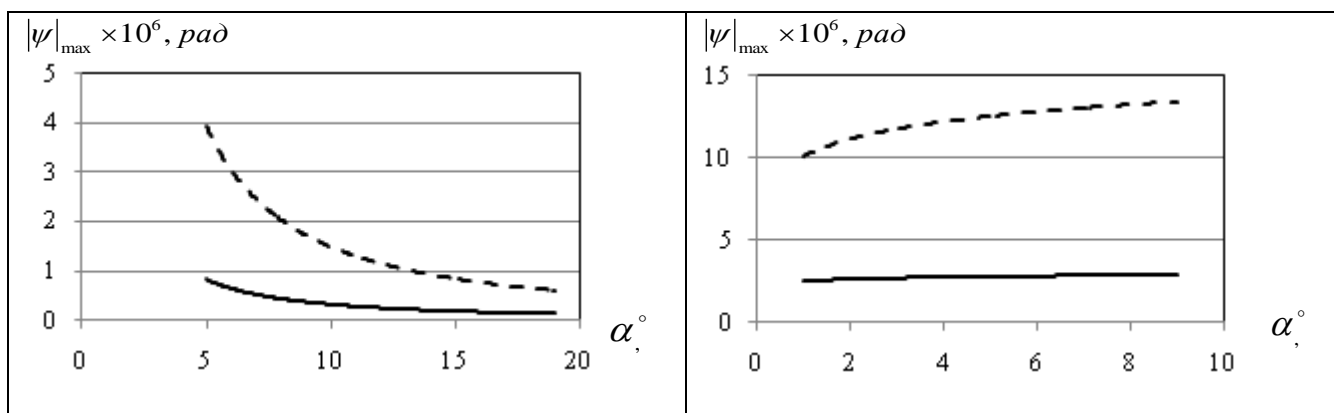


Рис. 6. Зависимости динамических ошибок, движущих моментов и сигналов отрицательной обратной связи от времени (составлено автором)

На рис.7 проиллюстрированы результаты анализа минимально достижимых динамических ошибок на втором приводе при охвате обратными связями двигателя и функционального звена в режиме 1-2 (слева) и 2-3 (справа).



— обратная связь с двигателя; -- обратная связь со звена

Рис. 7. Зависимость динамических ошибок от угла наклона орбиты (составлено автором)

Составленные уравнения движения позволили выполнить исследование динамики трехосного телескопа в режиме сопровождения при различных углах наклона орбиты, при работе в различных режимах.

Исследование позволило оценить в режиме сопровождения на различных орбитах динамические ошибки, движущие моменты и управляющие напряжения на двигателях трехосного телескопа как функции времени в режимах 1-2 и 2-3. Исследованы динамические особенности при охвате обратной связью с двигателя и звена в различных точках областей устойчивости. Представлены графики зависимостей от угла наклона орбиты максимальных значений модулей динамических ошибок и движущих моментов на двигателях. Проведен сравнительный анализ минимально достижимых динамических ошибок при охвате обратными связями двигателя и функционального звена. Анализ показал, что в обоих режимах динамические ошибки с обратной связью взятой с двигателя меньше, чем с обратной связью взятой со звена и можно обеспечить их максимальную величину не превышающую 3" в области ограничений управляющих воздействий, крутящих моментов и степеней устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Villard Ray Hubble to proceed with full search for new horizons targets. Space Telescope Science Institute, Baltimore, Md. URL: <http://www.stsci.edu/hst/> (дата обращения: 15.10.2013).
2. First folding space telescope aims to “break the glass ceiling” of traditional designs [электронный ресурс]. Defense Advanced Research Projects Agency, Arlington. URL: <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2013/12/05.aspx> (дата обращения: 01.06.2014).
3. Бельский А.Б., Здор С.Е., Колинко В.И., Яцкевич Н.Г. Окно в космос [Электронный ресурс]. Воздушно-Космическая оборона №2, 2010г. Режим доступа: URL: <http://www.vko.ru/oruzhir/okno-v-kosmos> (дата обращения: 10.02.2012).
4. Романенко В.П. Автоматизация наведения 1-метрового телескопа САО РАН, «Мехатроника, автоматика, управление», Часть 1- №4, 2006. – С. 51-55; часть 2- №5, 2006. – С. 42-46.
5. Окно в космос [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.redstar.ru/2007/10/18_10/2_02.html ГУК, «Красная звезда» (дата обращения 27.03.2012).
6. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Взаимовлияние приводов астробашни [Текст]. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й международной научно-технической конференции. 14-15 июня 2012 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 540-547;
7. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Кинематическое исследование телескопа [Текст]. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й международной научно-технической конференции. 19-20 июня 2014 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 237-246.
8. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Исследование динамики телескопа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. – № 3 (202). – С. 219–228.
9. Коловский М.З., Евграфов А.Н., Семенов Ю.А. Теория механизмов и машин. Учеб. пособие. – М.: Академия, 2008. – 588 с.
10. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода [Текст]: Учебное пособие для вузов/ Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. - М.: Энергия, 1979–СПб.: Изд-во «Энергия», 1979г. – 614с.

Рецензент: Каразин Владимир Игоревич, доктор технических наук, профессор кафедры теории механизмов и машин ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Санкт-Петербург, Россия.

Nigmatullina Farida Rasimovna

Saint-Petersburg State Polytechnic University (SPBSTU)
Russia, Saint-Petersburg
E-Mail: farida_17@mail.ru

Tereshin Valerii Alekseevich

Saint-Petersburg State Polytechnic University (SPBSTU)
Russia, Saint-Petersburg
E-Mail: terva@mail.ru

Dynamic errors of the three-axis telescope in the maintenance mode

Abstract: Possibilities of steering of the, the accuracy of its positioning and dynamic characteristics are considered in the article.

Areas of stability of system with feedback from a link and from the engine are studied. Dynamic characteristics of the telescope in two modes of behavior at maintenance of an artificial satellite of the earth in several points of area of stability at different discharge angles of an orbit are investigated.

The movement equations for the description of dynamic processes in the multi-engine steered car with the spatial gear are worked out.

It is shown in the work that at the description of the dynamic processes happening in each module it is necessary to consider influence of other drive gears. Mutual influence of dynamic mistakes between drive gears almost completely is absent.

The comparative analysis of minimum possible dynamic mistakes at coverage is carried out by feedback of the engine and a functional link. The comparative analysis showed inexpediency of use of sensors of provision of functional links for formation of signals of feedback at maintenance of the objects moving on an orbit. The organization of feedback for the provision of rotors of engines provides more exact maintenance of space objects. However, when using telescopes for tracking the maneuvering objects coverage by feedback of the elastic transmission gear can be necessary.

Keywords: dynamic analysis of mechanisms; dynamic errors; three-axis telescope; accuracy of guidance of the telescope; steering of the telescope; basic and rotary device; telescope mechanics.

REFERENCES

1. Villard Ray Hubble to proceed with full search for new horizons targets. Space Telescope Science Institute, Baltimore, Md. URL: <http://www.stsci.edu/hst/> (data obrashcheniya: 15.10.2013).
2. First folding space telescope aims to “break the glass ceiling” of traditional designs [elektronnyy resurs]. Defense Advanced Research Projects Agency, Arlington. URL: <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2013/12/05.aspx> (data obrashcheniya: 01.06.2014).
3. Bel'skiy A.B., Zdor S.E., Kolin'ko V.I., Yatskevich N.G. Okno v kosmos [Elektronnyy resurs]. Vozdushno-Kosmicheskaya oborona №2, 2010g. Rezhim dostupa: URL: <http://www.vko.ru/oruzhir/okno-v-kosmos> (data obrashcheniya: 10.02.2012).
4. Romanenko V.P. Avtomatizatsiya navedeniya 1-metrovogo teleskopa SAO RAN, «Mekhatronika, avtomatika, upravlenie», Chast' 1- №4, 2006. – S. 51-55; chast' 2- №5, 2006. – S. 42-46.
5. Okno v kosmos [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: URL: http://www.redstar.ru/2007/10/18_10/2_02.html GUK, «Krasnaya zvezda» (data obrashcheniya 27.03.2012).
6. Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Vzaimovliyanie privodov astrobashni [Tekst]. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 14-15 iyunya 2012 goda, Sankt-Peterburg / pod red. M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – S. 540-547;
7. Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Kinemacheskoe issledovanie teleskopa [Tekst]. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 4-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 19-20 iyunya 2014 goda, Sankt-Peterburg / pod red. M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. – S. 237-246.
8. Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Issledovanie dinamiki teleskopa // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2014. – № 3 (202). – S. 219–228.
9. Kolovskiy M.Z., Evgrafov A.N., Semenov. Yu.A. Teoriya mekhanizmov i mashin. Ucheb. posobie. – M.: Akademiya, 2008. – 588 s.
10. Chilikin M.G. Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda [Tekst]: Uchebnoe posobie dlya vuzov/ Chilikin M.G., Klyuchev V.I., Sandler A.S.- M.: Energiya, 1979– SPb.: Izd-vo «Energiya», 1979g. – 614s.