

УДК 62-187.4

Ф.Р. Нигматуллина, В.А. Терешин

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЛЕСКОПА

N.F. Nigmatullina, V.A. Tereshin

RESEARCH ON TELESCOPE DYNAMICS

Необходимость детального рассмотрения низколетящих космических объектов искусственного и естественного происхождения, в том числе «космического мусора», вызвала интенсивное развитие технологий в сфере создания точных механизмов и датчиков, а также в области программирования и мощных систем обработки информации. Появились возможности создания качественно новых систем наблюдения за космическими объектами, а так же модификации существующих. Статья посвящена модернизации трехосного телескопа, заключающейся в охвате системой управления передаточных механизмов. Выполненный анализ зависимостей динамических ошибок, динамических нагрузок в приводах и сигналов управления от основных параметров системы при различных законах движения наблюдаемого объекта показал возможность уменьшения динамических ошибок телескопа до величин менее 0,0001 радиан. Получены количественные оценки взаимного влияния приводов. Определены области устойчивости системы управления. Предложенный алгоритм формирования и решения уравнений движения пространственного управляемого многоступенчатого механизма может быть реализован на персональном компьютере.

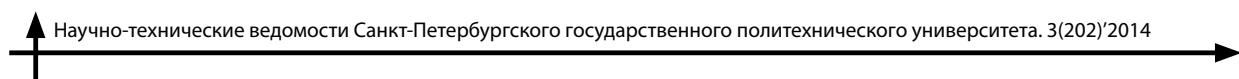
ТЕЛЕСКОП; ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ; ДВИЖЕНИЕ ТЕЛЕСКОПА; ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ; ДИНАМИЧЕСКИЕ ОШИБКИ; ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ; УПРАВЛЕНИЕ ТЕЛЕСКОПОМ; СЛЕЖЕНИЕ; СОПРОВОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ; ТОЧНОСТЬ НАВЕДЕНИЯ.

The urgency of detailed considering low-flying artificial and natural space objects and “space debris” caused the technological boom in the sphere of creating high precision mechanisms, sensors, programming and powerful information processing systems. This enabled developing brand-new space tracking systems and modifying the existing ones. The present work is devoted to studying opportunities to modernize a three-axis telescope with the control system of transmission gears. The authors analyzed dependencies of dynamic errors, dynamic loads in drives and steering signals on system critical parameters using various laws of motion for an object under observation. The analysis showed possibility to reduce dynamic errors of a telescope to more than 0,0001 radians. The paper presents quantitative values of the drives mutual influence and determines areas of control system stability. The algorithm of forming and solving the equations of motion of a spatial operated multi-phase mechanism can be realized on the personal computer.

TELESCOPE; DYNAMIC ANALYSIS OF MECHANISMS; TELESCOPE MOVEMENT; TRANSITION MODES; DYNAMIC ERRORS; DYNAMIC LOADS; TELESCOPE CONTROL; TRACKING; SPACE ESCORTING; GUIDANCE ACCURACY.

Изучение космического пространства занимает приоритетное место в современной науке. Для наблюдения за космосом создаются различные системы, прежде всего телескопы наземного и космического базирования, а так же модернизируются многие из них, созданные ранее. В силу развития технологий в сфере программирования, создания мощных систем об-

работки информации, более точных датчиков и механизмов появились возможности для решения новых задач, таких, как наблюдение за «космическим мусором» и детальное рассмотрение поверхности искусственных и естественных космических объектов. Основной проблемой при решении таких задач является уменьшение ошибок, вызванных самыми разными причинами.



ми, например неидеальностью геометрических параметров механической части, смещениями и деформациями зеркал [1] и фотопластиинок [2] и др. Кроме того, телескопы космического базирования не предназначены для наблюдения за низкоорбитальными спутниками [3]. Имеется информация о попытках создания оптического телескопа, расположенного на геосинхронной орбите, для наблюдения за наземными объектами размером до 3 метров, движущимися со скоростью до 100 км/ч [4]. Во многих случаях экономически оправданно не создание новых систем, а технологическая доработка существующих [5]. Прежде всего это касается установки новых, более совершенных датчиков цепей обратных связей и элементной базы системы управления. Для обоснования возможности и целесообразности такого усовершенствования необходимо выполнить предварительные расчеты на основе математической модели объекта управления. Математическая модель предназначена прежде всего для анализа технических характеристик системы и ее внутренних параметров.

Цель данной работы — исследование целесообразности изменения системы управления телескопом, а именно установки более точных датчиков угла и охвата обратной связью передаточных механизмов. Такая модернизация, безусловно, должна повысить точность измерения относительных положений функциональных звеньев телескопа, а значит, и точность наведения [6]. Однако в силу больших передаточных чисел редукторов важную роль в системе управления играют их упруго-диссилативные свойства, значительно уменьшающие область устойчивости и усиливающие динамические процессы. Современные телескопы имеют точность наведения 10^{-5} радиан [7]. Выполненные нами расчеты показали, что указанная модернизация может обеспечить данный уровень точности.

Было проведено исследование динамики телескопа с тремя степенями подвижности, сделана оценка точности позиционирования, быстродействия, определены динамические характеристики при контурном управлении. Общий вид телескопа, пространственная кинематическая схема и уравнения, связывающие законы

движения с движущими моментами, представлены в [8].

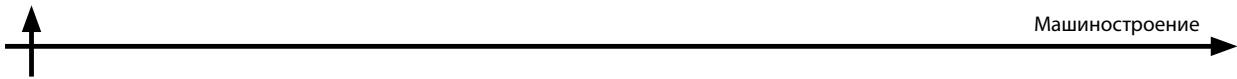
Законы программного движения приводов как функции времени при сопровождении объектов, движущихся равномерно по круговым орбитам, решение обратной задачи геометрии для различных вариантов работы телескопа, приведены в [9].

На динамические процессы в механизмах телескопа влияют не только инерционные и прочие параметры, но и система управления [10]. Для получения более надежных расчетов, не связанных с интегрированием громоздкой системы дифференциальных уравнений, описывающей одновременно все три управляемых модуля, целесообразно ограничиться ее первым приближением: исследовать динамику каждого управляемого модуля отдельно, а влияние на него других модулей характеризовать моментами, которые они создают при программном движении. В работе получены аналитические выражения для этих моментов как воздействий, создаваемых силами инерции на программном движении. Известно, что исследуемая механическая система хорошо уравновешена, поэтому можно не учитывать моменты от сил тяжести.

Для решения такого рода задач в работе составлена динамическая модель, учитывающая инерционные характеристики наиболее массивных подвижных звеньев и роторов двигателей, как наиболее быстроходных элементов конструкции. Редукторы характеризуются передаточными числами и упруго-диссилативными параметрами, приведенными к входам. Двигатели описываются линейными динамическими характеристиками. На рис. 1 проиллюстрирована модель одного из трех идентичных модулей по каждой степени подвижности.

Их совокупность составляет динамическую модель телескопа.

Взаимовлияние приводов [8] является возмущающим фактором $L(t)$ и учитывается только через добавки к крутящим моментам на выходах модулей; они вызваны моментами сил инерции всех звеньев при движении всей системы, кроме звена исследуемого модуля. В силу малости динамических ошибок возмущение можно определять на программном движении согласно уравнению



$$L(t) = -\frac{Q(t)}{i} + I\ddot{\phi}_n(t),$$

где $Q(t)$ — крутящий момент на выходном валу редуктора, определяемый с помощью уравнения Лагранжа II рода как обобщенная сила, создаваемая силами инерции всех звеньев механизма при его программном движении; i — передаточное число редуктора; $\ddot{\phi}_n(t)$ — обобщенное ускорение на программном движении. При исследовании динамических процессов упруго-инерционные свойства приводов играют основную роль [11]. Для слежения за космическими объектами механизм телескопа должен иметь две степени свободы, однако при этом всегда есть углы, при прохождении которых в системе возникают недопустимо большие угловые ускорения. Чтобы избежать этих особых положений механизмы телескопов изготавливают с тремя степенями свободы [12, 13]. После определения параметров орбиты объекта наблюдения назначается режим работы телескопа, задается совокупность работающих приводов (1–2 или 2–3). На рис. 2, 3 сплошной и штриховой линиями показаны графики крутящих $Q(t)$ и возмущающих $L(t)$ моментов на характерных программных движениях (Нм, с); $\alpha, {}^\circ$ — угол наклона плоскости орбиты сопровождаемого спутника относительно местной вертикали. Из рис. 2, 3 видно, что в режиме 1–2 при увеличении угла наклона орбиты моменты убывают. Расчеты показали, что в режиме 2–3 при аналогичном увеличении угла моменты возрастают.

Дальнейшее исследование позволило обосновать целесообразность применения режима 1–2 в диапазоне углов наклона орбиты от 2 до 19 градусов, а режима 2–3 — при прохождении объекта вблизи зенита в диапазоне от 0 до 2 градусов. Спутники с наклоном орбиты больше 19 градусов при рассматриваемой высоте 400 км над горизонтом не поднимаются.

При работе приводов 1–2 (см. рис. 2, 3) крутящий момент на третьем приводе полностью определяется гироскопическим моментом звена 3 из-за его вращения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Так же проанализировав моменты при работе приводов 2–3, можно сделать вывод, что крутящий момент на третьем приводе полностью определяется слагаемым $I_3\ddot{\phi}_{n3}(t)$, так как гироскопический момент пер-

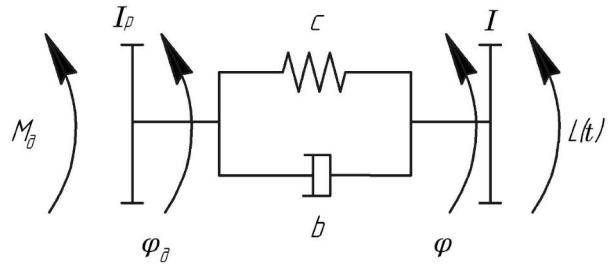


Рис. 1. Динамическая модель модуля:

I и I_p — момент инерции функционального звена и ротора двигателя; $L(t)$ — возмущающий момент; c и b — жесткость и коэффициент демпфирования редуктора; M_d — движущий момент; φ_d , φ — углы поворота ротора двигателя и звена

перпендикулярен оси относительного вращения звена 3. При этом крутящий момент на первом приводе создается моментами сил инерции второго и третьего модулей.

На рис. 4 представлена структурная схема исследуемой системы управления с обратными связями, снимаемыми с функционального звена [14].

Опишем движение модуля системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\begin{aligned} I_p \ddot{\phi}_d &= M_d + c(\varphi - \varphi_d) + b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_d); \\ \dot{I}\dot{\phi} &= -c(\varphi - \varphi_d) - b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_d) + L(t); \\ \tau \dot{M}_d + M_d &= -s\dot{\varphi}_d + ru, \end{aligned}$$

где τ , s и r — собственная постоянная времени, крутизна статической (механической) характеристики двигателя и коэффициент пропорциональности; u — управляющий сигнал на двигателе; M_d — движущий момент (момент электромагнитных сил), приложенный к ротору двигателя; φ_d , φ — угол поворота ротора двигателя и приведенный к нему угол поворота звена.

В преобразованиях Лапласа и с учетом динамических ошибок $\Psi_d = \varphi_d - \varphi_n$, $\Psi = \varphi - \varphi_n$ система принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} I_p [p^2(\Phi_n + \Psi_d) - p\varphi_d(0) - \dot{\varphi}_d(0)] &= \\ = M + c(\Psi - \Psi_d) + b[p\Psi - \varphi(0) - p\Psi_d + \varphi_d(0)] &; \\ I [p^2(\Phi_n + \Psi) - p\varphi(0) - \dot{\varphi}(0)] &= \\ = -\frac{Q(p)}{i} + I [p^2\Phi_n - p\varphi_n(0) - \dot{\varphi}_n(0)] - & \\ - c(\Psi - \Psi_d) - b[p\Psi - \varphi(0) - p\Psi_d + \varphi_d(0)] &; \end{aligned}$$

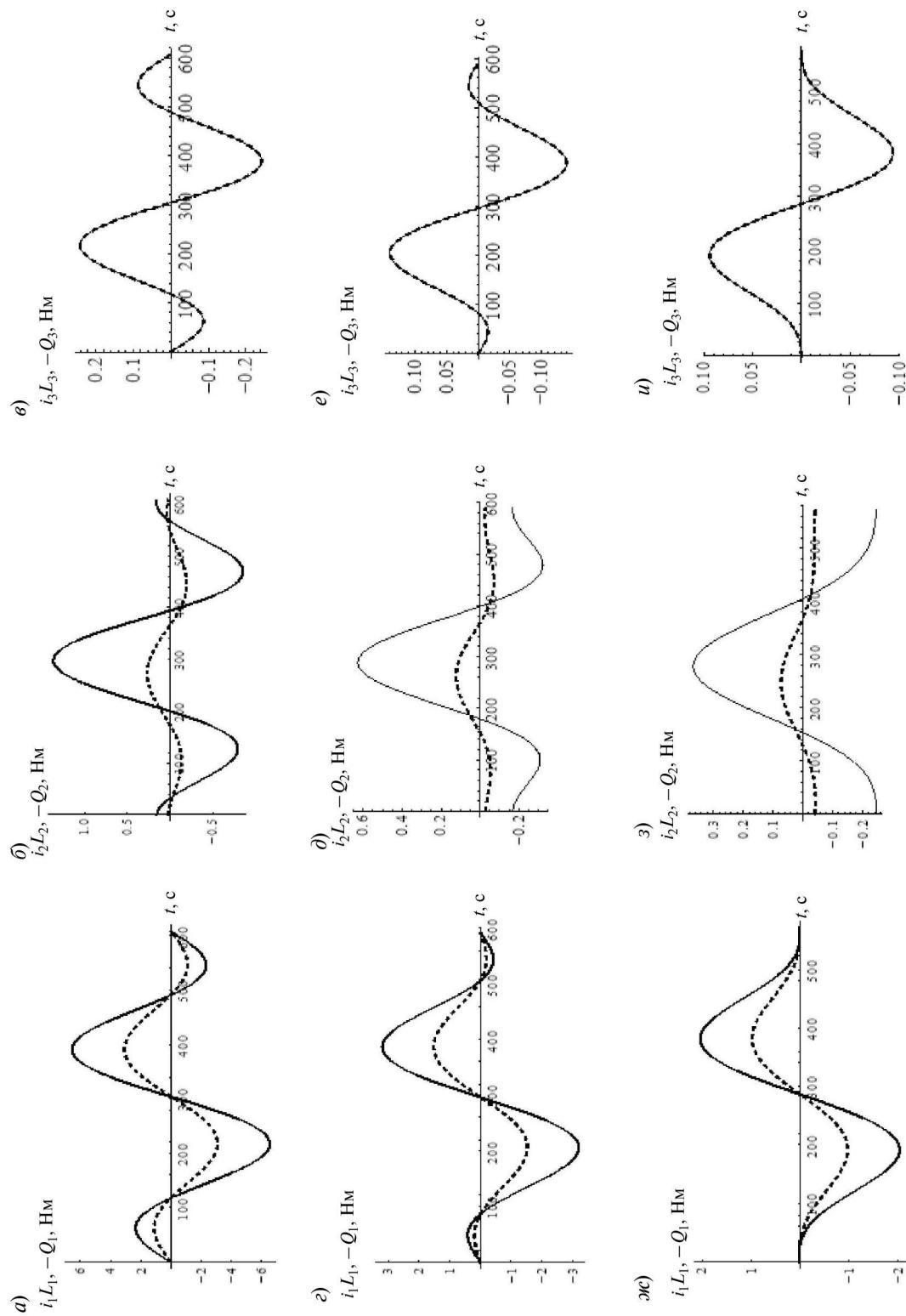


Рис. 2. Возмущающие $i_k L_k$ (пунктирная линия) и кривые Q_k (сплошная линия) моменты ($k = 1, 2, 3$) при движении первого и второго приводов при угле наклона плоскости орбиты α равном 2° (a, b, d), 5° (c, e) и 7° (ж, з, u)

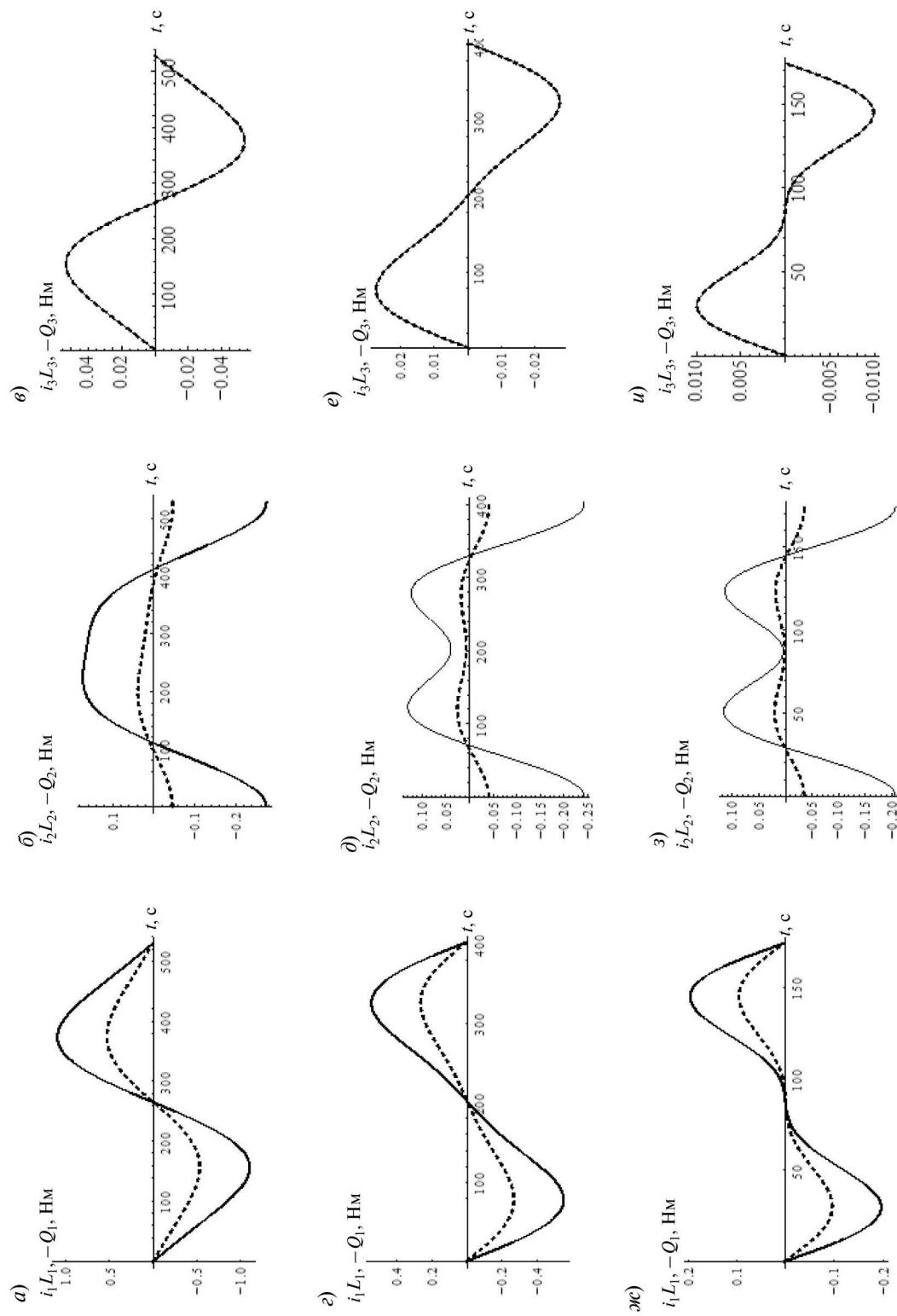


Рис. 3. Возмущающие $i_\kappa L_\kappa$ (пунктирная линия) и крутящие Q_κ (сплошная линия) моменты ($\kappa = 1, 2, 3$) при движении первого и второго приводов при угле наклона плоскости орбиты α равном 10° (*a, b, e*), 15° (*c, d, f*) и 19° (*ж, з, у*)

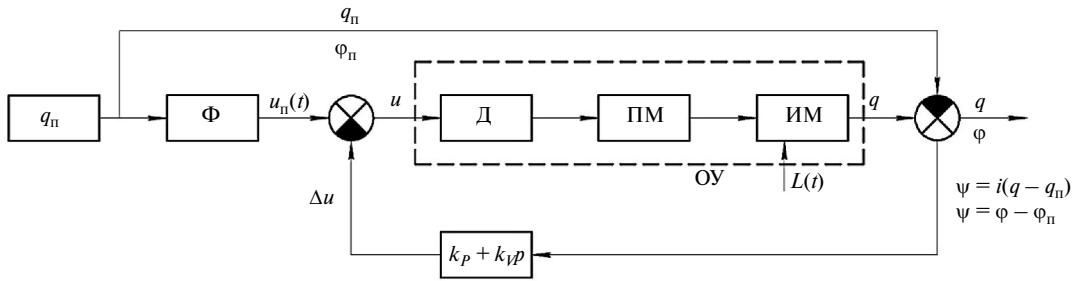


Рис. 4. Структурная схема системы управления

ПМ — передаточный механизм; ИМ — исполнительный механизм; Д — двигатель; Φ — блок формирования программного управления; ОУ — объект управления; $k_V p + k_P$ — передаточная функция цепи обратной связи; p — оператор дифференцирования по времени; ψ — столбец динамических ошибок

$$\begin{aligned}
 & (\tau p + 1)M - \tau M_{\text{д}}(0) = \\
 & = -(sp + rk_{V\Delta}p + rk_{P\Delta})\Psi_{\Delta} - r(k_V p + k_P)\Psi - \\
 & - s\varphi_n(0) + s\varphi_{\Delta}(0) - rk_V\varphi(0) + rk_{V\Delta}\varphi_{\Delta}(0) - \\
 & - rk_V\varphi_n(0) - rk_{V\Delta}\varphi_n(0).
 \end{aligned}$$

Запишем систему в матричном виде:

$$\begin{bmatrix}
 I_p p^2 + bp + c & -(bp + c) & -1 \\
 -(bp + c) & I_p p^2 + bp + c & 0 \\
 sp + r(k_{V\Delta}p + k_{P\Delta}) & r(k_V p + k_P) & \tau p + 1
 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{\Delta} \\ \Psi \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 -I_p [(p^2\Phi_n - p\varphi_{\Delta}(0) - \dot{\varphi}_{\Delta}(0)) + b[\varphi_{\Delta}(0) - \varphi(0)]] \\
 -\frac{Q(p)}{i} - b[\varphi_{\Delta}(0) - \varphi(0)] + I[p\varphi(0) + \dot{\varphi}(0) - p\varphi_n(0) - \dot{\varphi}_n(0)] \\
 \tau M_{\Delta}(0) - s\varphi_n(0) + s\varphi_{\Delta}(0) + rk_V\varphi(0) + rk_{V\Delta}\varphi_{\Delta}(0) - rk_V\varphi_n(0) - rk_{V\Delta}\varphi_n(0)
 \end{bmatrix}.$$

Проведено исследование полученной системы уравнений движения на устойчивость для двух вариантов управления при охвате обратной связью двигателя ($k_{V\Delta}p + k_{P\Delta}$) и передаточного механизма ($k_V p + k_P$).

В силу сложности закона программного движения $q_{ni}(t)$ как функции времени невозможно определить для него преобразование Лапласа. Из-за сравнительной гладкости программного движения можно заменить его близкими функциями, удобными для преобразования. Вполне допустимо

в качестве аппроксимирующей функции $q_{\Phi}(t)$ использовать конечную сумму ряда Фурье.

При разложении программного движения в ряд Фурье на интервале от 0 до t_p ограничимся первыми двумя гармониками:

$$\begin{aligned}
 q_{\Phi} = & \left(q_{a0} + q_{a1} \cos\left(\frac{2\pi t}{t_p}\right) + q_{b1} \sin\left(\frac{2\pi t}{t_p}\right) + \right. \\
 & \left. + q_{a2} \cos\left(\frac{4\pi t}{t_p}\right) + q_{b2} \sin\left(\frac{4\pi t}{t_p}\right) \right) \times \\
 & \times [H(t) - H(t - t_p)],
 \end{aligned}$$

где $H(t)$ — единичная функция Хевисайда; q_{a0} , q_{a1} , q_{a2} , q_{b1} , q_{b2} — коэффициенты ряда Фурье.

Достаточность учета второй гармоники для режима управления приводами 1–2 проиллюстрирована на рис. 5, где пунктирными линиями изображено программное движение до разложения в ряд Фурье, а сплошными линиями — после. В дальнейшем потребуются значения законов программного движения и их первых производных в начальный момент времени. Аналогично для удобства выполнения преобразований Лапласа заменим сложную функцию $Q(t)$ конечной суммой ряда Фурье $Q_{\Phi}(t)$. В силу относительно медленного изменения $Q(t)$ достаточно ограничиться также двумя гармониками.

После замены $Q(t)$ аппроксимирующей функцией $Q_{\Phi}(t)$ можно воспользоваться преобразованием Лапласа от нее и решить матричное уравнение. На рис. 6 показано практически точное совпадение $Q_{\Phi}(t)$ и $Q(t)$ при работе приводов 1–2. Аналогичные практически полные совпа-

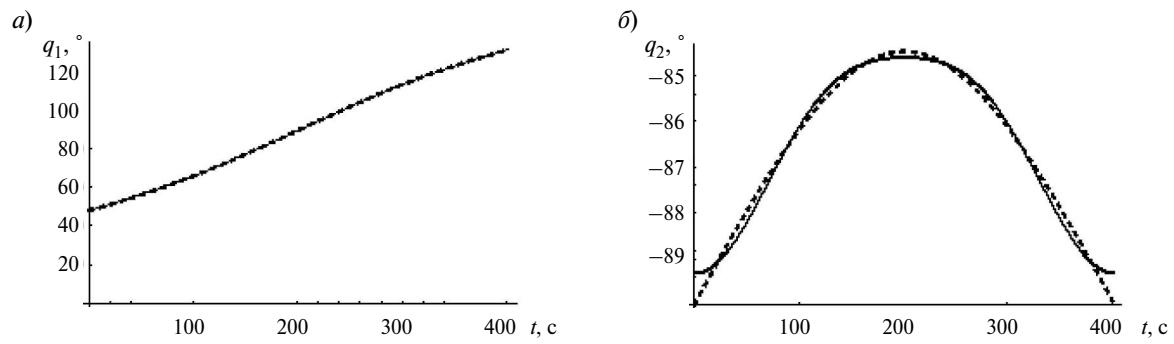


Рис. 5. Программное движение первого (a) и второго (б) приводов

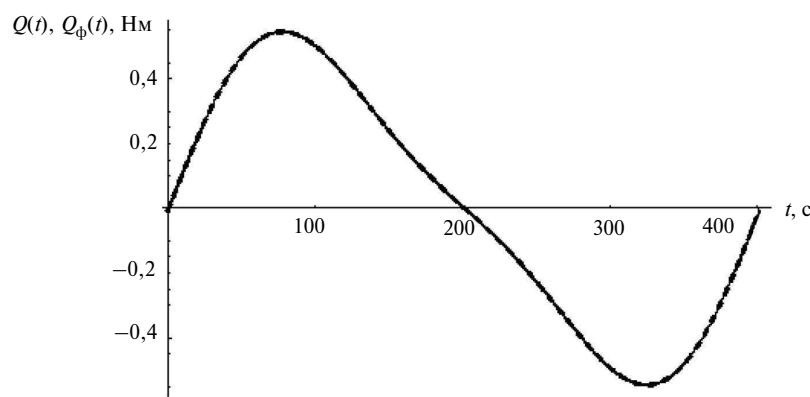


Рис. 6. Графики зависимости крутящего момента и его аппроксимации от времени

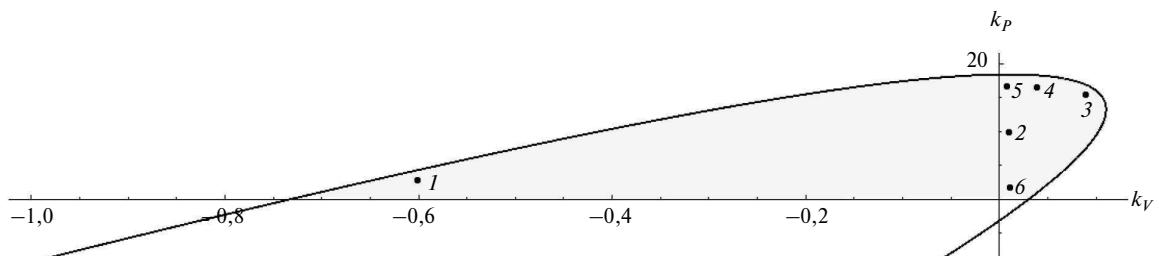


Рис. 7. Область устойчивости в режиме сопровождения

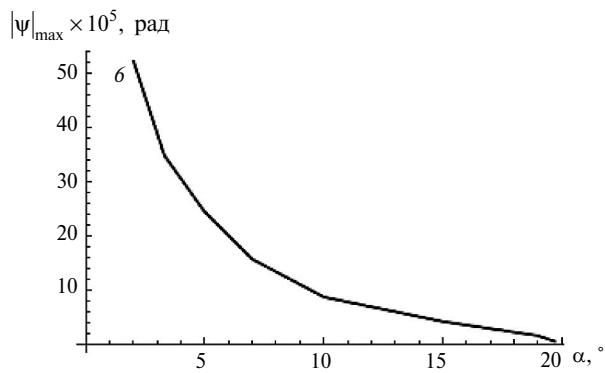
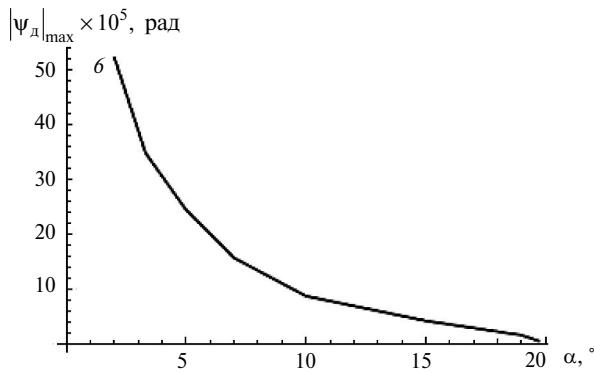
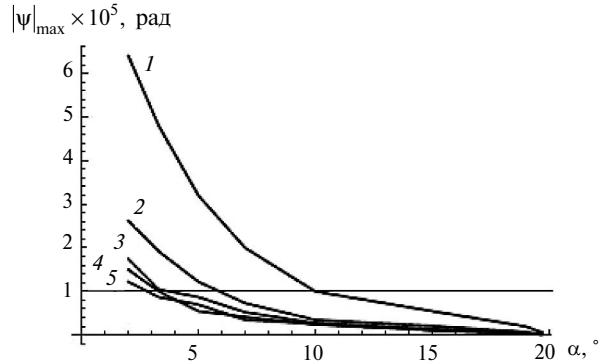
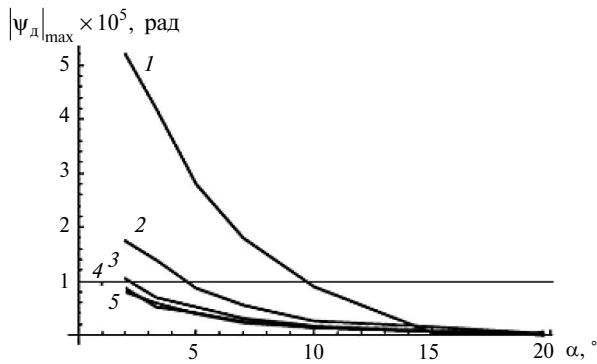


Рис. 8. Зависимости динамических ошибок на двигателе от угла наклона орбиты при различных коэффициентах обратной связи на первом приводе (динамические ошибки приведены к звену):

1 — $k_V = -0,6; k_p = 4$; 2 — $k_V = 0,05; k_p = 10$;
3 — $k_V = 0,09; k_p = 15$; 4 — $k_V = 0,05; k_p = 17$;
5 — $k_V = 0,01; k_p = 17$; 6 — $k_V = 0,01; k_p = 0,05$

Рис. 9. Зависимость динамических ошибок звена от угла наклона орбиты при различных коэффициентах обратной связи на первом приводе

1 — $k_V = -0,6; k_p = 4$; 2 — $k_V = 0,05; k_p = 10$;
3 — $k_V = 0,09; k_p = 15$; 4 — $k_V = 0,05; k_p = 17$;
5 — $k_V = 0,01; k_p = 17$; 6 — $k_V = 0,01; k_p = 0,05$

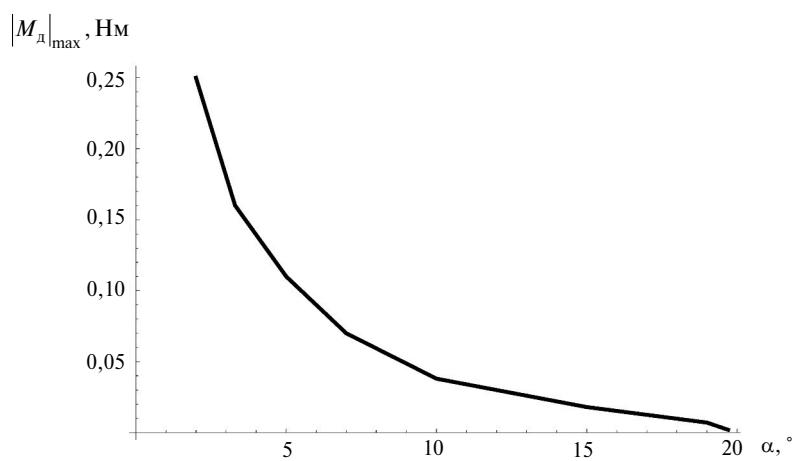


Рис. 10. Зависимость движущего момента на двигателе первого привода от угла наклона орбиты



дения можно наблюдать при всех возможных программных движениях.

После выполненных преобразований и решения системы уравнений можно проанализировать необходимые зависимости динамических ошибок телескопа, динамических нагрузок в приводах и сигналов управления от основных параметров системы.

Возьмем несколько точек (рис. 7), входящих в область устойчивости в режиме сопровождения, и проанализируем зависимость максимальных ошибок от коэффициентов обратной связи при работе приводов 1–2 [9]. Рассмотрим ошибки на первом приводе на двигателе (рис. 8) и на звене (рис. 9), а так же моменты (рис. 10).

Матричное уравнение позволяет выполнить достаточно полное исследование динамики движения системы при различных углах наклона плоскости орбиты, как при работе в режиме приводов 1–2, так и 2–3.

Исследование позволило оценить динамические ошибки, движущие моменты и сигналы управления во всех приводах телескопа при различных коэффициентах обратных связей и законах программного движения. Выполненные расчеты доказывают возможность уменьшения динамических ошибок до величин менее 10^{-5} радиан, а следовательно, целесообразность предложенной модернизации. Поставленная задача может быть исследована на персональном компьютере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амур Г.И. Оптимальные методы изготовления астрономических зеркал: Диссертация ... на / Ленинградский институт точной механики и оптики, Ленинград, 1984. URL:<http://www.disscat.com/content/optimalnye-metody-izgotovleniya-astronomicheskikh-zerkal> (дата обращения: 10.05.2014).
2. Сорокин Ф.Д. Разработка механической модели формирования и методов редукции позиционных ошибок телескопа Шмидта на основе уточненной нелинейной теории оболочек: дисс. ... Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Москва, 2003. URL:<http://www.disscat.com/content/razrabotka-mekhanicheskoi-modeli-formirovaniya-i-metodov-reduktsii-pozitsionnykh-oshibok-tel> (дата обращения: 10.05.2014).
3. Villard R. 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).
4. First folding space telescope aims to “break the glass ceiling” of traditional designs / Defense Advanced Research Projects Agency, Arlington. URL: <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2013/12/05.aspx> (дата обращения: 01.06.2014).
5. Бельский А.Б., Здор С.Е., Колинько В.И., Яцкевич Н.Г. Окно в космос [Электронный ресурс]. Воздушно-Космическая оборона №2, 2010 г. Режим доступа: URL: <http://www.vko.ru/oruzhir/okno-v-kosmos> (дата обращения: 10.02.2012).
6. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода Учебное пособие для вузов М., СПб.: Энергия, 1979. 614 с.
7. Combrinck L. Proposed re-location and conversion of CNES SLR system to South Africa in collaboration with OCA and the greater ILRS community / International Institute for Space Geodesy and Earth Observation. Germany. URL: <http://www.hartrao.ac.za/iisgeo/projects.php> (дата обращения: 25.11.2012).
8. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Взаимовлияние приводов астробашни // Современное машиностроение. Наука и образование: матер. 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.
9. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Кинематическое исследование телескопа // 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.
10. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Sloush A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer — Verlag, 2000, 394 p.
11. Ouarda I., Wisama K. Inverse and direct dynamic models of hybrid robots // Mechanism and Machine Theory. 2010. Vol. 45, Iss. 4. P. 627–640.
12. Chablat D., Angeles J. On the kinetostatic optimization of revolute-coupled planar manipulators // Mechanism and Machine Theory. 2002. Vol. 37, Iss. 4. P. 351–374.
13. Yi Yue, Feng Gao, Xianchao Zhao, Q. Jeffrey Ge. Relationship among input-force, payload, stiffness and displacement of a 3-DOF perpendicular parallel micro-manipulator // Mechanism and Machine Theory. 2010. Vol. 45, Iss. 5. P. 756–771.
14. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2010. 624с.

REFERENCES

1. Amur G.I. Optimalnyye metody izgotovleniya astronomiceskikh zerkal: Dissertatsiya / Leningradskiy institut tochnoy mekhaniki i optiki. Leningrad, 1984. URL:<http://www.dissercat.com/content/optimalnye-metody-izgotovleniya-astronomiceskikh-zerkal> (data obrashcheniya: 10.05.2014). (rus.)
2. Sorokin F.D. Razrabotka mekhanicheskoy modeli formirovaniya i metodov reduktsii pozitsionnykh oshibok teleskopa Shmidta na osnove utochnennoy nelineynoy teorii obolochek: Dissertatsiya / Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. N.E. Baumana. Moskva, 2003. URL:<http://www.dissercat.com/content/razrabotka-mekhanicheskoi-modeli-formirovaniya-i-metodov-reduktsii-pozitsionnykh-oshibok-tel> (data obrashcheniya: 10.05.2014). (rus.)
3. Villard R. Hubble to proceed witt full search for new horizons targets. Space Telescope Science Institute. Baltimore, Md. URL: <http://www.stsci.edu/hst/> (data obrashcheniya: 15.10.2013).
4. First folding space telescope aims to “break the glass ceiling” of traditional designs / Defense Advanced Research Projects Agency. Arlington. URL: <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2013/12/05.aspx> (data obrashcheniya: 01.06.2014).
5. Belskiy A.B., Zdor S.Ye., Kolinko V.I., Yatskevich N.G. Okno v kosmos. Vozdushno-kosmicheskaya oborona. 2010. №2. (rus.)
6. Chilikin M.G., Klyuchev V.I., Sandler A.S. Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda: Uchebnoye posobiye dlya vuzov. M., SPb.: Energiya, 1979. 614. (rus.)
7. Combrinck L. Proposed re-location and conversion of CNES SLR system to South Africa in collaboration with OCA and the greater ILRS community / International In-
- stitute for Space Geodesy and Earth Observation. Germany. URL: <http://www.hartrao.ac.za/iisgeo/projects.php> (data obrashcheniya: 25.11.2012).
8. Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Vzaimovliyanie privodov astrobashni Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye: materialy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. 14–15 iyunya 2012 goda, Sankt-Peterburg / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Yevgrafova. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. S. 540–547.
9. Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Kinematicheskoye issledovaniye teleskopa. Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye: materialy 4-y mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. 19–20 iyunya 2014 goda, Sankt-Peterburg / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Yevgrafova. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. S. 237–246. (rus.)
10. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer—Verlag. 2000. 394 p.
11. Guarda I., Wisama K. Inverse and direct dynamic models of hybrid robots. *Mechanism and Machine Theory*. 2010. Vol. 45, Iss. 4. P. 627–640.
12. Chablat D., Angeles J. On the kinetostatic optimization of revolute-coupled planar manipulators. *Mechanism and Machine Theory*. 2002. Vol. 37, Iss. 4. P. 351–374.
13. Yi Yue, Feng Gao, Xianchao Zhao, Q. Jeffrey Ge. Relationship among input-force, payload, stiffness and displacement of a 3-DOF perpendicular parallel micro-manipulator. *Mechanism and Machine Theory*. 2010. Vol. 45, Iss. 5. P. 756–771.
14. Pervozvanskiy A.A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnoye posobiye. 2-ye izd., ster. — SPb.: Izd-vo Lanç, 2010. 624 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НИГМАТУЛЛИНА Фарида Расимовна — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: farida_17@mail.ru

ТЕРЕШИН Валерий Алексеевич — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: terva@mail.ru

AUTHORS

NIGMATULLINA Farida R. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: farida_17@mail.ru

TERESHIN Valerii A. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: terva@mail.ru