

С. А. Тушев

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент В. С. Томасов
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРСКОЙ КАЧКИ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА

Целью проекта является разработка и исследование системы управления прецизионными электроприводами телескопа, установленного на палубе корабля, позволяющей компенсировать влияние морской качки без использования гиростабилизированной платформы. Результаты работы были использованы при разработке и проектировании систем цифровых прецизионных электроприводов опорно-поворотного устройства многофункционального оптико-локационного судна связи «Маршал Крылов».

Электропривод, телескоп, гиростабилизированная платформа, прецизионный, система управления.

The purpose of the project is the development and research of control system of precision electric drive of a telescope mounted on the deck of the ship that is able to compensate the influence of ship motions without using gyro-stabilized platform. The results were used in the development and design of digital precision electric drives of slewing device installed on the multifunction optical-radar vessel communication "Marshal Krylov."

Electric drive, telescope, gyro-stabilized platform, precision, system of control.

Введение.

Одной из задач современного прецизионного приборостроения можно назвать создание оптических телескопов на качающемся основании без использования гиростабилизированной платформы, когда ОПУ устанавливается прямо на палубе корабля. Причиной отказа от гиростабилизированной платформы являются ее низкие динамические характеристики, не позволяющие достичь необходимого быстродействия прецизионных электроприводов осей ОПУ при условии компенсации качки корабля. Трудность заключается в том, что система управления телескопа должна отрабатывать сложное периодическое воздействие и обеспечить точность наведения порядка единиц угловых секунд в условиях морской качки. Причем такое качество наведения необходимо выполнять при вращающихся массах порядка нескольких сотен килограмм, при постоянном изменении момента инерции азимутальной оси ОПУ.

Проблема повышения точности позиционирования системы управления телескопа существует продолжительное время. Над ее решением успешно работали такие известные ученые, как: Ю. А. Борцов, А. В. Башарин, Г. Г. Соколовский, В. М. Терехов, С. В. Тарарыкин, В. В. Путов, В. И. Ключев и мн. др. Однако проблема управления телескопом, установленным на палубе корабля без гиростабилизированной платформы, появилась сравнительно недавно. По этой причине ей не уделено достаточно внимания научным сообществом.

Реализация прецизионных электроприводов телескопа траекторных измерений, устанавливаемого непосредственно на палубе корабля без использования гиростабилизированной платформы, позволит не только существенно снизить затраты на дополнительное оборудование, но и повысить быстродействие системы наведения и конечную точность сопро-

вождения космического объекта. Поэтому задачи исследования и разработки систем управления такими электроприводами являются вполне актуальными.

Целью работы является разработка и исследование системы управления прецизионными электроприводами телескопа, установленного на палубе корабля, позволяющей компенсировать влияние морской качки без использования гироплатформы. Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- 1) анализ влияния компенсации морской качки на формирование задающего воздействия прецизионного электропривода осей ОПУ телескопа и его моделирование;
- 2) анализ влияния морской качки на характеристики дополнительных динамических возмущающих воздействий приложенных к осям ОПУ телескопа;
- 3) задача выбора и обоснования комплекса математических моделей двухосевого электропривода телескопа с учетом зависимости момента инерции азимутальной оси телескопа от положения угломестной оси;
- 4) задача синтеза системы управления двухосевого прецизионного электропривода с учетом заданных статических и динамических параметров;
- 5) экспериментальная проверка результатов работы системы управления на физическом макете азимутальной оси ОПУ телескопа.

Основная часть.

Задающее воздействие при морской качке. Для оценки влияния качки на задание угловых координат ОПУ определяется закон, по которому меняются координаты в системе координат (СК), связанной с кораблем. Для выполнения этой задачи совмещается начало отсчета СК с точкой пересечения осей ОПУ.

Ось абсцисс (X) направлена параллельно киллю корабля, ось ординат (Y) – проходит с одного борта на другой, ось аппликат (Z) перпендикулярна палубе. Пусть координаты цели определяются как $A(x, y, z)$ в инерциальной СК. Тогда в подвижной СК эта точка будет иметь координаты $A(x', y', z')$. При определении зависимостей $x' = f(x, y, z)$, $y' = f(x, y, z)$ и $z' = f(x, y, z)$ все виды качки рассматриваются независимо друг от друга [4].

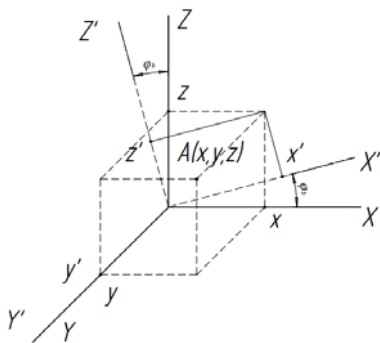


Рис. 1. Преобразование координат при килевой качке

Схема килевой качки корабля представлена на рис. 1. Угол θ определяет мгновенную величину килевой качки и, как следствие, угол между осями X и X' и Z и Z' , вращение осуществляется вокруг оси Y , которая в данном случае совпадает с осью Y' .

Для каждого вида качки на основании геометрических построений получены формулы, связывающие координаты корабельной и инерциальной СК. ОПУ имеет две оси вращения и, соответственно, две угловые координаты – азимут (АЗ) и угол места (УМ):

$$\begin{aligned} \text{АЗ}(x, y)_n &= \begin{cases} \arctg(\frac{y}{x}), & x \geq 0 \\ \arctg(\frac{y}{x}) + 180^\circ, & x < 0, \text{АЗ}_{(n-1)} > 0 \\ \arctg(\frac{y}{x}) - 180^\circ, & x < 0, \text{АЗ}_{(n-1)} \leq 0, \end{cases} \\ \text{УМ}(x, y) &= \arctg\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где АЗ_n и $\text{АЗ}_{(n-1)}$ – текущее и предыдущее положение азимутальной оси соответственно. АЗ ось телескопа имеет диапазон вращения $\pm 270^\circ$, знак текущего угла зависит от предыдущего значения угла. При этом при положительной координате x азимут находится в зоне однозначности. УМ ось телескопа имеет диапазон вращения $[0^\circ; 90^\circ]$.

Морская качка в общем случае представляет собой случайный процесс с известной спектральной плотностью. Однако в первом приближении ее можно описать основной гармонической составляющей каждого вида качки [7].

С помощью разработанной математической модели получены задающие воздействия при каждом

виде качки по отдельности, а также их суммарное воздействие на ОПУ. Для обобщения полученной информации на графиках фиксируется разброс задающих значений АЗ и УМ при различных координатах объекта, и соответствующие им средние значения углов ОПУ, а также скорости и ускорения каждой оси. Все виды качки имеют разные амплитуду и частоту, поэтому в различных точках наблюдения качка будет проявляться по-разному. Для обобщения влияния качки исследуются семейства траекторий движения объектов наблюдения при положении азимутальной оси в диапазоне $[0^\circ; +90^\circ]$.

Обобщая анализ данных, полученных при моделировании задающего воздействия с компенсацией качки, можно заключить, что морская качка с указанными параметрами ограничивает допустимый диапазон возможных положений объекта наблюдения на уровне $[10^\circ; 75^\circ]$. Ограничение связано, во-первых, с тем, что с приближением УМ координаты цели к области зенита скорости и ускорения АЗ оси увеличиваются в десятки раз. Энергосистема электропривода не может отработать требуемые ускорения, что приводит систему в целом в неработоспособное состояние. Во-вторых, при нахождении цели вблизи 0° УМ ось телескопа должна повернуться на отрицательный угол, что конструктивно невозможно.

Возмущающие воздействия при морской качке. Морская качка оказывает многостороннее влияние на управление опорно-поворотным устройством телескопа. В частности, вращательные виды качки приводят к появлению дополнительных динамических возмущающих воздействий на оси ОПУ. В случае альт-азимутальной монтровки, вследствие наличия переменной составляющей момента инерции АЗ оси, на нее действует момент, вызванный рысканием и зависящий от положения УМ оси.

На УМ ось действует момент, вызванный бортовой и килевой качкой и зависящий от положения АЗ оси, так как от этого зависит угол между осями координат и проекцией УМ оси на горизонтальную плоскость [6].

Параметры каждого вида качки различны и зависят от положения осей телескопа, поэтому математическое моделирование возмущающего воздействия необходимо провести в широком диапазоне координат объекта наблюдения. Диапазон азимутальной координаты объекта $[0^\circ; 90^\circ]$, угломестной – от $[0^\circ; 75^\circ]$.

Структура модели возмущающих воздействий представлена на рис. 2. Блок задания параметров морской качки (1) формирует на выходе шесть сигналов, соответствующих каждому виду качки. Блок задающего воздействия (2) формирует задание для обеих осей с учетом морской качки таким образом, что даже при выполнении указания «стояние в точке» воздействие на систему управления носит сложный характер с множеством гармонических составляющих. Блок формирования возмущающего воздействия (3) определяет величину и характер изменения возмущающих воздействий на осях, вызванных качкой корабля. Блок фиксации результатов мо-

делирования (4) обеспечивает сохранение максимальных, минимальных и средних значений динамических возмущений.

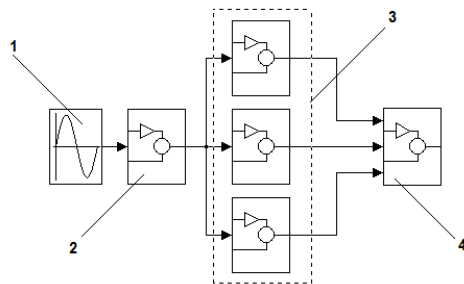


Рис. 2. Структура модели возмущающих воздействий

В результате проведенного математического моделирования получены значения максимальных динамических возмущающих моментов, вызванных морской качкой, с учетом переменного момента инерции АЗ оси в зависимости от положения УМ оси. Анализ графика показывает, что максимальные и средние моменты отличаются для различных координат УМ. Максимальный динамический момент 24,5 Нм достигается при УМ 0° и постепенно снижается с увеличением УМ до 21 Нм. Средний момент находится в диапазоне 13,5–15,5 Нм.

Максимальный возмущающий момент УМ оси 12,7 Нм достигается при АЗ около 45°, спадая при азимуте 0° и 90° (так как при этих координатах на угломестную ось действует только один вид качки). Средний момент около 5 Нм во всем рассматриваемом диапазоне координат объекта наблюдения. Для рассмотренного ОПУ максимальные значения возмущений составляют 24,5 Нм и 12,7 Нм для азимутальной и угломестной оси. При учете изменения момента инерции азимутальной оси за счет изменения положения угломестной максимальный возмущающий динамический момент снижается на 15 % при УМ 75°.

Математическая модель объекта управления.

Проблема взаимного влияния его осей актуальна для телескопа, установленного на качающемся основании, так как при этом различным образом проявляется характер и величина внешних возмущающих воздействий. Важно принимать во внимание факт, что при движении осей момент инерции меняется с некоторой скоростью, при этом добавляется еще одно состояние в модели объекта управления. Для учета влияния положения одной оси на момент инерции другой необходимо определить характер этой зависимости [5].

Динамический момент определяется как скорость изменения импульса, а импульс, в свою очередь, определяется как произведение момента инерции тела на его угловую скорость. Момент инерции АЗ оси включает постоянную составляющую и переменную составляющую, которая зависит от текущего положения УМ оси. Так как на ОПУ действует морская качка, то положение УМ оси переменное даже в ре-

жиме «стояние в точке», а момент инерции АЗ оси также изменяется во времени [3].

Динамический момент для переменного момента инерции выражается как

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt}, \quad (2)$$

где J – момент инерции, ω – угловая скорость.

Если $J \frac{d\omega}{dt}$ много больше $\omega \frac{dJ}{dt}$, то момент инерции оси меняется настолько медленно, что его можно считать постоянным. В общем случае, необходимо учитывать уравнение состояния момента инерции АЗ первой оси J_1 . Допустим, что момент инерции первой оси определяется как:

$$J_1(t) = J_{st1} + J_v(t). \quad (3)$$

В формуле (3) момент инерции АЗ оси состоит из двух компонентов: постоянной J_{st1} и переменной составляющей $J_v(t)$. В данном случае постоянная составляющая – это та часть момента инерции, которая остается неизменной при изменении положения УМ оси ОПУ. Переменная составляющая, в свою очередь, зависит от положения УМ оси и определяется формулой (4).

$$J_v(t) = J_{10}(\cos^2 \alpha_2 + k \sin^2 \alpha_2). \quad (4)$$

Тогда производная по времени $\dot{J}_v$ описывается формулой, полученной при дифференцировании выражения (4):

$$\dot{J}_v = J_{10}(k-1)\omega_2 \sin(2\alpha_2). \quad (5)$$

В формуле (5) J_{10} – момент инерции АЗ оси при горизонтальном положении второй оси, k – коэффициент, зависящий от геометрических параметров УМ оси, определяет соотношение моментов инерции УМ оси при 0 и при 90°, α_2 и ω_2 – положение и скорость УМ оси соответственно. Таким образом, полная система уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{M}_1 &= \frac{\beta_1}{T_{e1}} \omega_{01} - \frac{\beta_1}{T_{e1}} \omega_1 - \frac{1}{T_{e1}} M_1 \\ \dot{\omega}_1 &= \frac{1}{J_{st1} + J_{v1}} M_1 - \frac{\beta_1}{J_{st1} + J_{v1}} M_{c1} - \frac{\omega_1}{J_{st1} + J_{v1}} J_{v1} \\ \dot{J}_{v1} &= J_{10}(k-1)\omega_2 \sin(2\alpha_2) \\ \dot{\alpha}_1 &= \omega_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{M}_2 &= \frac{\beta_2}{T_{e2}} \omega_{02} - \frac{\beta_2}{T_{e2}} \omega_2 - \frac{1}{T_{e2}} M_2 \\ \dot{\omega}_2 &= \frac{1}{J_2} M_2 - \frac{\beta_2}{J_2} M_{c2} \\ \dot{\alpha}_2 &= \omega_2. \end{aligned}$$

Если момент инерции АЗ оси изменяется достаточно медленно, то можно не учитывать его скорость изменения. Тогда в системе на рис. 4 уйдет связь pJ_1 , что приведет к простой зависимости J_1 от $\alpha_{ум}$. В системе уравнений (6) количество состояний уменьшится до шести.

Моделирование показало, что соотношение производных $J \frac{d\omega}{dt}$ и $\omega \frac{dJ}{dt}$ колеблется в диапазоне от 200 до 550, а среднее соотношение производных – около 400. Таким образом, первое слагаемое производной $d(J\omega)/dt$ превышает второе более чем на два порядка.

Для рассматриваемой системы делается вывод, что при таком соотношении составляющих производной можно использовать модель объекта без учета динамики момента инерции. Это значительно упрощает синтез системы управления электропривода телескопа на качающемся основании.

Особенности системы управления телескопа на качающемся основании. В качестве системы управления для каждой оси выбирается подчиненная система регулирования, содержащая два контура: контур скорости и контур положения. Контур скорости настраивается на технический оптимум, контур положения – на симметричный оптимум. Такая структура обеспечивает второй порядок астатизма по управляющему воздействию и первый порядок астатизма по возмущению [2].

В ходе исследования рассмотрено четыре системы, а именно:

- система без учета переменного момента инерции;
- неадаптивная система с учетом переменного момента инерции;
- адаптивная система с учетом переменного момента инерции;
- адаптивная система с дополнительной переменной состоянием.

Определено, что если требуется построить регулятор, не учитывающий переменный момент инерции оси, то его необходимо настраивать при макси-

мальном моменте инерции. В данном случае, при положении УМ оси 0° . В случае же, когда есть возможность усложнить регулятор и необходимо обеспечить максимальную точность отработки задающего воздействия, разумно строить самонастраивающийся регулятор. Однако для этого необходимо знать закон, по которому можно вычислить текущий момент инерции. Результаты работы рассмотренных систем сведены в таблице.

Несмотря на то, что характеристики системы с учетом переменного момента инерции и неадаптивным регулятором по точности несколько хуже при больших значениях УМ координаты объекта, ее можно рекомендовать для реализации на испытательном стенде.

С целью подтверждения успешной работоспособности предложенных алгоритмов было проведено экспериментальное исследование разработанной системы управления на стенде кафедры ЭТ и ПЭМС Университета ИТМО [1].

Быстродействие скоростного контура реальной системы настраивается исходя из условия обеспечения времени переходного процесса 45 мс при скачке задающего воздействия. Результаты работы системы при отработке задающего воздействия с компенсацией качки представлены на рис. 3, где показаны графики изменения положения и ошибки по положению при различных углах АЗ оси. Величина среднеквадратичного отклонения (СКО) ошибки по положению при отработке задающего воздействия с компенсацией качки не превышает $2'10''$. С целью повышения точности отработки морской качки была использована схема комбинированного управления с подачей на контур скорости производной задания по положению. При использовании комбинированного управления СКО ошибки по положению снизилось в 1,5 раза и составило $1'34''$.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило работоспособность разработанных алгоритмов и возможность их технической реализации.

Таблица

Характеристики рассмотренных систем управления

	Неадаптивный регулятор, объект с постоянным моментом инерции	Неадаптивный регулятор, объект с переменным моментом инерции, без учета его динамики	Адаптивный регулятор, объект с переменным моментом инерции, без учета его динамики	Адаптивный регулятор, объект с учетом динамики момента инерции
СКО при скачке задания в установившемся режиме, "	0,051	0,110	0,051	0,052
Максимальное СКО при морской качке, "	3,621	3,630	3,621	3,623
Минимальное СКО при морской качке, "	3,531	3,540	3,531	3,532

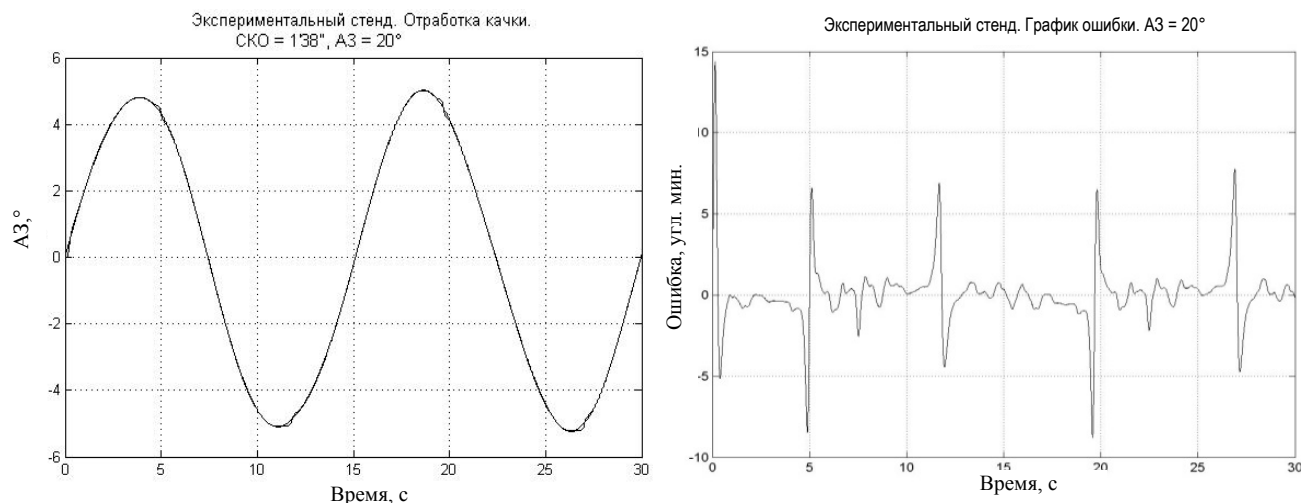


Рис. 3. а) график задания и положения АЗ оси; б) ошибка по положению АЗ оси

Закключение.

В работе решена актуальная задача построения системы управления телескопа на качающемся основании без использования гироскопов. Основные результаты:

- 1) проведен анализ характерных особенностей влияния морской качки на формирование задающего воздействия на электропривод осей телескопа;
- 2) разработана математическая модель, позволяющая определить диапазон допустимых координат объекта управления, в котором электропривод телескопа способен выполнить непрерывное наблюдение;
- 3) разработана математическая модель, позволяющая определить величину и характер динамических возмущающих моментов на осях ОПУ, возникающих под влиянием морской качки;
- 4) разработанный комплекс математических моделей может быть использован при проектировании прецизионных приборостроительных комплексов, расположенных на качающемся основании без применения гироскопизированной платформы.

Основные результаты, полученные автором, были использованы при разработке и проектировании систем цифровых прецизионных электроприводов опорно-поворотного устройства многофункционального оптико-локационного комплекса судна связи «Маршал Крылов».

Результаты работы могут быть использованы в следующих областях:

- 1) системы наведения мобильных робототехнических комплексов и ракетных установок на подвижном основании;
- 2) прецизионные телескопы оптических и траекторных измерений, установленных на подвижных основаниях;

- 3) цифровые следящие электроприводы прецизионных приборостроительных комплексов.

Литература

1. Гурьянов А. В., Денисов, К. М. Программный комплекс СБПЭТ (система быстрого прототипирования электропривода телескопа). РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2009611420 от 12.09.2009.
2. Кротенко, В. В. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства / [В. В. Кротенко и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – №11. – С. 30–35.
3. Овчинников, И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). Курс лекций / И. Е. Овчинников. – СПб., 2010.
4. Тушев, С. А. Влияние морской качки на диапазон допустимых координат объекта наблюдения телескопа на палубе корабля / С. А. Тушев, В. Н. Дроздов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново. – 2013. – №4. – С. 54–58.
5. Тушев, С. А. Выбор математической модели электропривода телескопа на качающемся основании для настройки системы управления / С. А. Тушев // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. – СПб., 2014. – С. 310.
6. Тушев, С. А. Исследование возмущающих воздействий, приложенных к осям телескопа на качающемся основании / С. А. Тушев, В. Н. Дроздов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – Вып. 3. – С. 59–64.
7. Tushev, S. A. The Ship Motions Effect on the Position Reference of Telescope's Axis Installed on the Deck of a Ship / S. A. Tushev, N. A. Smirnov, V. N. Drozdov // Manufacturing Engineering, Automatic Control and Robotics. – 2014. – P. 194–199.