

УДК 681.5.015

## Влияние морской качки на диапазон допустимых координат объекта наблюдения телескопа на палубе корабля

В.Н. Дроздов, С.А. Тушев

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
E-mail: sergy5@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Существующие решения в области управления опорно-поворотными устройствами телескопов траекторных измерений, установленных на качающемся основании, предполагают наличие гиросtabilизированной платформы. В связи с этим актуальной становится задача построения системы управления без использования стабилизирующего устройства и с компенсацией морской качки средствами прецизионного электропривода. Такая задача предполагает, в том числе, изучение влияния качки на задающее воздействие системы управления.

**Материалы и методы:** Математическая модель задающего воздействия электропривода телескопа построена с учетом шести видов морской качки.

**Результаты:** Проведено исследование влияния морской качки на характер задающего воздействия электропривода осей телескопа для семейства траекторий движения объекта в диапазоне  $[0^\circ; +90^\circ]$  по азимуту и углу места.

**Выводы:** Предложенная модель морской качки позволяет определить сужение диапазона допустимых координат объекта наблюдения, при которых электропривод может обеспечить требуемое ускорение. Полученные результаты актуальны для разработчиков прецизионных электроприводов телескопов с морским базированием.

**Ключевые слова:** морская качка, прецизионный электропривод, преобразование координат, телескоп на подвижном основании.

## Ship motions influence on the range of possible coordinates of an object observed through a telescope from the deck

V.N. Drozdov, S.A. Tushev

National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
Saint-Petersburg, Russian Federation  
E-mail: sergy5@mail.ru

### Abstract

**Background:** The existing solutions in the field of trajectory measurement telescope rotary support devices installed on a rocking base require a gyrostabilized platform. Therefore, it is urgent to develop a control system without a stabilizing device in which the ship's motions are compensated for by a precision electric drive. This task includes, among other problems, studying the influence of ship's motions on the control system reference signal.

**Materials and methods:** The reference mathematical model of telescope electric drive takes into account six kinds of ship's motions.

**Results:** The authors have studied the influence of ship's motions on the telescope axis electric drive reference signal for the target motion path family within the azimuth and elevation angle range of  $[0^\circ; +90^\circ]$ .

**Conclusions:** The proposed motions model allows determining the decrease in the possible target coordinate range within which the electric drive can provide the required acceleration. The article is helpful to developers of precision electric drives of sea-based telescopes.

**Key words:** ship's motions, precision electric drive, coordinate transformation, telescope on a mobile basis.

**Введение.** Опорно-поворотное устройство (ОПУ) телескопа установлено на палубе корабля без гиросtabilизированной платформы. Предполагается, что в районе использования телескопа действует морская качка с определенными параметрами, при которых электропривод телескопа должен обеспечивать заданную точность. Компенсация влияния морской качки обеспечивается самим электроприводом. Целью является оценка диапазона допустимых координат объекта в условиях действия шести видов качки [1].

**Преобразование координат.** Для оценки влияния качки на задание угловых координат

ОПУ необходимо определить закон, по которому меняются координаты в системе координат (СК), связанной с кораблем. Для выполнения этой задачи нужно совместить начало отсчета СК с точкой пересечения осей ОПУ. Ось абсцис  $X$  направлена параллельно килю 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.

Схема килевой качки корабля представлена на рис. 1. Угол  $\theta$  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  $Y'$ .

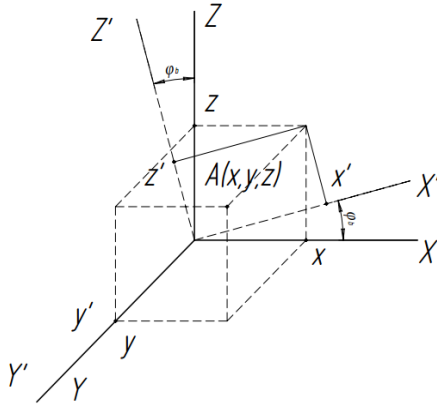


Рис. 1. Преобразование координат при килевой качке

На основании геометрических построений получены формулы, связывающие координаты корабельной и инерциальной СК:

$$x' = x \cos(\psi) + z \sin(\psi); \quad (1)$$

$$y' = y; \quad (2)$$

$$z' = z \cos(\psi) - x \sin(\psi). \quad (3)$$

Угол  $\psi$  определяется формулой

$$\psi(t) = \Psi \sin(2\pi \cdot t / T_k), \quad (4)$$

где  $\Psi$  – амплитуда килевой качки;  $T_k$  – период килевой качки.

Аналогичные преобразования для бортовой качки и рыскания:

$$x' = x; \quad (5)$$

$$y' = y \cos(\theta) + z \sin(\theta); \quad (6)$$

$$z' = z \cos(\theta) - y \sin(\theta). \quad (7)$$

$$\theta(t) = \Theta \sin(2\pi \cdot t / T_b), \quad (8)$$

где  $\Theta$  – амплитуда килевой качки;  $T_b$  – период бортовой качки;

$$x' = x \cos(\varphi) - y \sin(\varphi); \quad (9)$$

$$y' = x \sin(\varphi) + y \cos(\varphi); \quad (10)$$

$$z' = z; \quad (11)$$

$$\varphi(t) = \Phi \sin(2\pi \cdot t / T_r), \quad (12)$$

где  $\Phi$  – амплитуда килевой качки;  $T_r$  – период рыскания.

Схема вертикальной качки корабля представлена на рис. 2. Величина  $h$  определяет мгновенное значение вертикальной качки и, как следствие, смещение по оси  $Z$ .

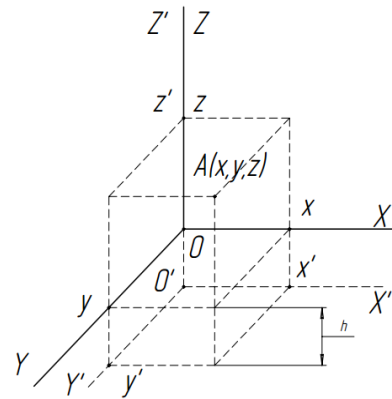


Рис. 2. Преобразование координат при вертикальной качке

Согласно геометрическим построениям, координаты цели в подвижной системе отсчета определяются следующими формулами:

$$x' = x; \quad (13)$$

$$y' = y; \quad (14)$$

$$z' = z + h. \quad (15)$$

Величина  $h$  определяется формулой

$$h(t) = H \sin(2\pi \cdot t / T_h), \quad (16)$$

где  $H$  – амплитуда вертикальной качки;  $T_h$  – период вертикальной качки.

Аналогичные преобразования для продольной и поперечной качки:

$$x' = x + I_k; \quad (17)$$

$$y' = y; \quad (18)$$

$$z' = z; \quad (19)$$

$$I_k(t) = L_k \sin(2\pi \cdot t / T_{I_k}), \quad (20)$$

где  $L_k$  – амплитуда продольной качки;  $T_{I_k}$  – период продольной качки.

$$x' = x; \quad (21)$$

$$y' = y + I_b; \quad (22)$$

$$z' = z; \quad (23)$$

$$I_b(t) = L_b \sin(2\pi \cdot t / T_{I_b}), \quad (24)$$

где  $L_b$  – амплитуда поперечной качки;  $T_{I_b}$  – период поперечной качки.

Опорно-поворотное устройство имеет две оси вращения и, соответственно, две угловые координаты – азимут и угол места, которые определяются, как показано на рис. 3. Азимут ( $Aз$ ) – угол между проекцией радиус-вектора цели на плоскость  $XOY$  и осью  $Y$ . Угол места ( $Ум$ ) – угол между радиус-вектором цели и его проекцией на плоскость  $XOY$ .

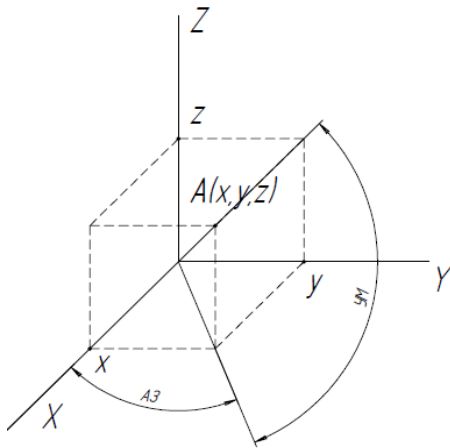


Рис. 3. Определение азимута и угла места

В соответствии с геометрическими построениями, представленными на рис. 3,  $Az$  и  $Um$  определяются следующими формулами:

$$Az(x, y)_n = \begin{cases} \arctg(\frac{y}{x}), x \geq 0, \\ \arctg(\frac{y}{x}) + 180^\circ, x < 0, Az_{n-1} > 0, \\ \arctg(\frac{y}{x}) - 180^\circ, x < 0, Az_{n-1} \leq 0; \end{cases} \quad (25)$$

$$Um(x, y) = \arctg\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right). \quad (26)$$

В формуле (25)  $Az_n$  и  $Az_{(n-1)}$  – текущее и предыдущее положение азимутальной оси соответственно. Согласно (25) и (26),  $Az$  является

функцией координат цели  $x$  и  $y$ , а  $Um$  – функция трех координат  $x, y, z$ .

Азимутальная 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 (1-й и 4-й квадранты), так как в нее можно попасть только одним способом. Угловая ось телескопа имеет диапазон вращения  $[0^\circ; +90^\circ]$  [1–3].

Конструктивно ОПУ выполнено так, что если угол места превышает  $90^\circ$ , то происходит разворот по азимутальной координате на  $180^\circ$ , что сопряжено с большим ускорением и скоростью азимутальной оси.

**Моделирование качки.** 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.

В точках наблюдения, близких к «зениту», ускорения на азимутальной оси значительно возрастают. Необходимо определить, при каких предельно возможных положениях  $Um$  электропривод может обеспечить непрерывное слежение за объектом. Для рассматриваемой системы реализуемое ускорение ограничено значением  $15^\circ/c^2$ , а скорость –  $30^\circ/c$ . Ограничение ускорения связано с возможностями энергоподсистемы, а ограничение по скорости вызвано особенностями работы оптических энкодеров.

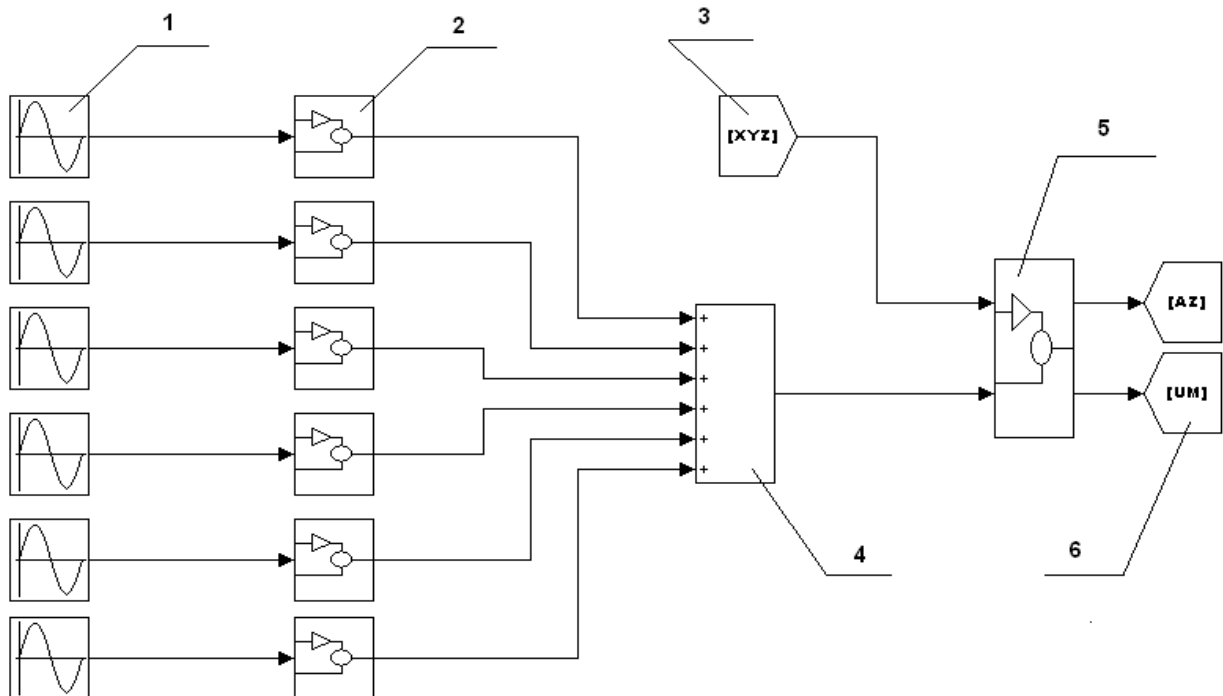


Рис. 4. Модель качки корабля: 1 – блок задания конкретного вида качки; 2 – блок преобразования из инерциальной системы координат в корабельную; 3 – координаты объекта в инерциальной системе координат; 4 – суммирование поправок от каждого вида качки; 5 – блок преобразования из координат XYZ в координаты Az-Um; 6 – вывод информации о задающем воздействии для каждой оси телескопа

В модели, приведенной на рис. 4, изучается задающее воздействие ОПУ в режиме «стояние в точке» и воздействие шести видов качки. С помощью данной модели могут быть 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  $Az$  и  $Um$  при различных координатах объекта и соответствующие им средние значения углов ОПУ, а также скорости и ускорения каждой оси.

Параметры качки, соответствующие району, в котором будет действовать корабль с исследуемым ОПУ, приведены в таблице.

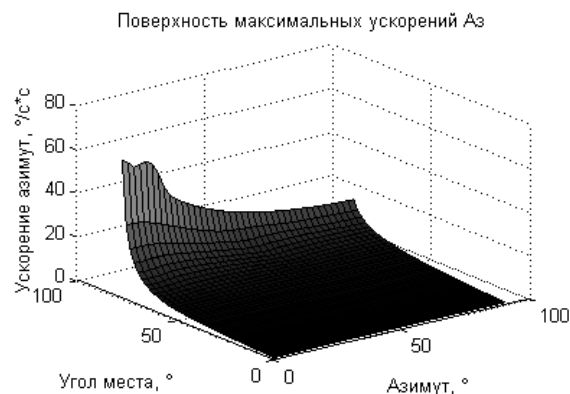
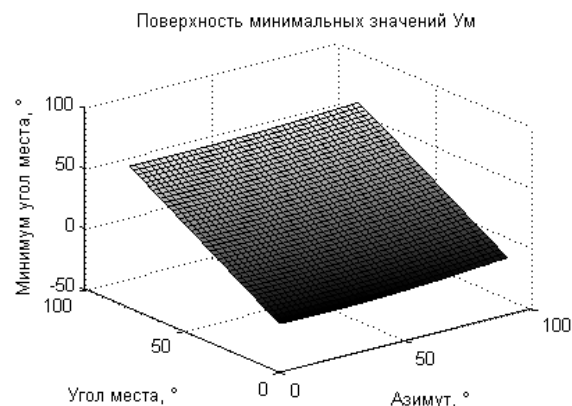
Параметры качки корабля

| Вид качки    | Амплитуда | Период, с |
|--------------|-----------|-----------|
| Бортовая     | 10°       | 12        |
| Килевая      | 3°        | 7         |
| Рыскание     | 5°        | 15        |
| Вертикальная | 4 м       | 9         |
| Продольная   | 3,5 м     | 10        |
| Поперечная   | 3,5 м     | 13        |

*Примечание:* данные в таблице соответствуют параметрам, указанным в техническом задании на систему управления телескопа.

В связи с тем, что каждый вид качки имеет параметры, отличные от других, в различных точках наблюдения качка будет проявляться по-разному. Другими словами, влияние качки зависит от курса корабля. Для обобщения влияния качки исследуются семейства траекторий движения объектов наблюдения при положении азимутальной оси в диапазоне  $[0^\circ; +90^\circ]$ . Для каждого значения  $Az$  строится траектория движения, представляющая собой четверть окружности с заданным радиусом и углом места в диапазоне от  $[0^\circ; +90^\circ]$  с прохождением точки «зенита».

На рис. 5 представлена поверхность максимальных ускорений задающих воздействий азимутальной оси. С увеличением угломестной координаты максимальные ускорения возрастают, причем при азимутальной координате, близкой к нулю, т. е. когда цель находится в направлении носа корабля, это увеличение более значительно. Указанные предельно возможные ускорения ограничивают рабочий диапазон углов на уровне  $75^\circ$  по  $Um$  при данных параметрах морской качки.

Рис. 5. Поверхность максимальных ускорений  $Az$  осиРис. 6. Поверхность минимальных значений  $Um$ 

На рис. 6 представлена поверхность минимальных задающих воздействий для угломестной оси в зависимости от различных координат объекта наблюдения. Если угол места цели в инерциальной системе отсчета менее  $10^\circ$ , то в определенные моменты времени ОПУ необходимо отработать отрицательный угол места, что конструктивно невозможно, так как диапазон  $Um - 0-90^\circ$ . Поэтому минимальное задание по углу места может быть не менее  $10^\circ$ , иначе телескоп не сможет непрерывно наблюдать за объектом.

## Заключение

Обобщая анализ приведенных графиков, 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 угломестной координаты цели к области «зенита» скорости и ускорения азимутальной оси увеличиваются в десятки раз. Энергоподсистема электропривода не может отработать требуемые ускорения, что приводит систему в целом в неработоспособное состояние. Во-вторых, при нахождении цели вблизи  $0^\circ$  по  $Um$  угломестная ось должна отработать отрицательное управляющее воздействие, что конструктивно невозможно.

Моделирование проводилось для семейства траекторий движения цели в диапазоне

[0 °; +90 °] по азимуту и углу места. В каждой точке траектории был отработан режим «стояние в точке» для определения максимальных и средних параметров движения осей телескопа.

Предложенная математическая модель морской качки позволяет определить, насколько сократится диапазон координат объекта наблюдения, в котором электропривод может обеспечить требуемое ускорение и перемещение осей телескопа и, как следствие, непрерывное слежение за объектом.

#### Список литературы

1. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
2. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 328 с.
3. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений / В.Н. Васильев, В.С. Томасов, В.Д. Шаргородский, М.А. Садовников // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – № 6. – С. 5–11.
4. Волков В.Г. Корабельные приборы ночного видения // Специальная техника. – 2006. – № 2.
5. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций. – СПб.: Изд-во «Корона-Принт», 2010. – 336 с.
6. Электроприводы высокоточных оптических комплексов контроля космического пространства / В.С. Тома-

сов, В.А. Толмачев, В.Н. Дроздов и др. // Труды VII Междунар. (XVIII Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново, 2012. – С. 213–216.

#### References

1. Rivkin, S.S. *Stabilizatsiya izmeritel'nykh ustroystv na kachayushchemsya osnovanii* [Stabilization of measuring devices placed on a rocking base]. Moscow, Nauka, 1978. 320 p.
2. Balkovoy, A.P., Tsatsenkin, V.K. *Pretsiyonnyy elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami* [AC converter-fed high precision electric motors]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 328 p.
3. Vasil'ev, V.N., Tomasov, V.S., Shargorodskiy, V.D., Sadovnikov, M.A. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya pretsiyonnykh elektroprivodov kompleksov vysokotochnykh nablyudeniya* [Status and prospects of precision servo drive development for high-precision observing systems]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2008, no. 6, pp. 5–11.
4. Volkov, V.G. *Korabel'nye pribory nochnogo videniya* [Ship night viewing devices]. *Spetsial'naya tekhnika*, 2006, no. 2.
5. Ovchinnikov, I.E. *Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove (malaya i srednyaya moshchnost')* [AC converter-fed motors and electric drives based on them (small and average power)]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo Korona-Print, 2010. 336 p.
6. Tomasov, V.S., Tolmachev, V.A., Drozdov, V.N., Denisov, K.M., Gur'yanov, A.V. *Elektroprivody vysokotochnykh opticheskikh kompleksov kontrolya kosmicheskogo prostranstva* [Electric drives for precision optical outer space control systems]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2012* [Proceedings of VII<sup>th</sup> International (XVIII<sup>th</sup> All-Russian) conference on the automated electric drive]. Ivanovo, 2012, pp. 213–216.

*Дроздов Валентин Нилович,*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,  
доктор технических наук, профессор кафедры ЭТ и ПЭМС,  
e-mail: drozdovuprint@rambler.ru

*Тушев Сергей Александрович,*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,  
аспирант кафедры ЭТ и ПЭМС,  
e-mail: sergy5@mail.ru