

## **Динамика автоматической системы управления с волоконно-оптическим гироскопом следящего координатора на базе оптико-электронного прибора**

А.В. Ракитин<sup>1,2</sup>, В.В. Костров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23

<sup>2</sup> АО «НИИ «Субмикрон» 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, с. 2  
E-mail: [alexey.rakitin@mail.ru](mailto:alexey.rakitin@mail.ru); [kostrov.46@mail.ru](mailto:kostrov.46@mail.ru);

*Представлены результаты исследований динамики следящей системы координатора с оптико-электронным прибором на основе болометрической матрицы. Рассмотрены переходные процессы в режимах слежения по угловому направлению и по угловой скорости, когда используются волоконно-оптические гироскопы. Разработаны функциональная и динамическая модели следящей системы. Реализован вариант конструкции координатора, позволяющий в рабочем режиме оперативно компенсировать внешние помехи в виде колебаний корпуса носителя.*

*Ключевые слова: оптико-электронная система, система автоматического управления, координатор, следящая система, волоконно-оптический гироскоп, переходной процесс.*

## **Dynamics of an automatic control system with a fiber-optic gyroscope tracking coordinator based on an optoelectronic device**

A.V. Rakitin<sup>1,2</sup>, V.V. Kostrov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Murom Institute of the Vladimir State University

<sup>2</sup> JSC Research Institute "Submicron"

*The results of studies of the dynamics of the tracking system of a coordinator with an optoelectronic device based on a bolometric matrix are presented. Transients in angular direction and angular velocity tracking modes when fiber-optic gyroscopes are used are considered. Functional and dynamic models of the tracking system have been developed. A design variant of the coordinator has been implemented, which makes it possible to quickly compensate for external interference in the form of vibrations of the carrier body in operating mode.*

*Keywords: optoelectronic system, automatic control system, coordinator, tracking system, fiber-optic gyroscope, transient process.*

### **Введение**

При наведении объекта управления (носителя оптико-электронного прибора – ОЭП) на цель ось координатора должна автоматически устанавливаться по линии «носитель-цель» или по другому заданному направлению [1,2]. Достигается это применением следящего координатора цели, который состоит из собственно координатора и системы автоматического слежения за целью. В настоящее время в самонаводящихся устройствах наибольшее применение в качестве системы автоматического слежения за целью получили двухступенчатые координаторы цели: сначала производится сопровождение траектории движения цели, а затем рассогласования обрабатывает автоматическая система управления ориентацией ОЭП. Заметим, что система автоматического управления может целенаправленно использоваться для стабилизации изображения ОЭП, установленных на подвижных объектах [3]. Среди методов управления для наблюдения быстро перемещающихся

целей наиболее распространенным является метод пропорционального сближения [1], при реализации которого ось координатора стабилизируется по линии «носитель-цель».

Следящий координатор с электроникой управления является сложной системой автоматического регулирования и управления. Принцип действия координатора основан на взаимодействии комплекса оптических, аппаратных и программных средств, обеспечивающих режимы целеуказания по углам захвата сигнала цели и сопровождения цели с обеспечением необходимой точности измерения ее угловых координат [4–6]. В соответствии с этим в состав всего привода также входят электромеханическая часть блока и электронные узлы управления.

В данном докладе основное внимание уделяется исследованию динамики автоматической системы управления ориентацией ОЭП. Предполагается, что управляющие напряжения рассогласования пропорциональны составляющим углов рассогласования в вертикальной или горизонтальной плоскости. Они подаются на систему автоматического управления приводом, который отрабатывает все рассогласования, а ось координатора совмещается с направлением на цель.

При вращении линии «носитель-цель» с постоянной угловой скоростью возникает установившийся процесс слежения, при котором угловое рассогласование остается постоянной величиной (в идеальном случае равной нулю) и появляется возможность определения проекций вектора угловой скорости линии «носитель-цель» на соответствующие оси.

### Функциональная схема привода

С кинематической точки зрения схема привод координатора дугового типа представляет собой карданный подвес, установленный в каретке на корпусе носителя. В состав основных элементов привода входят синусно-косинусные трансформаторы (СКТ – датчики угла), исполнительные двигатели разгрузки (М), тахогенераторы (ТГ – датчики скорости углового вращения), волоконно-оптические гироскопы (ВОГ – датчики угловой скорости интерферометрического типа, основанные на эффекте Саньяка.). Элементами конструкции являются также: верхняя рамка, нижняя дуга, каретка, редукторы и подшипники. Функциональная схема электропривода представлена на рис. 1. Схема отражает взаимодействие управляющих команд и сигналов в основных блоках привода.

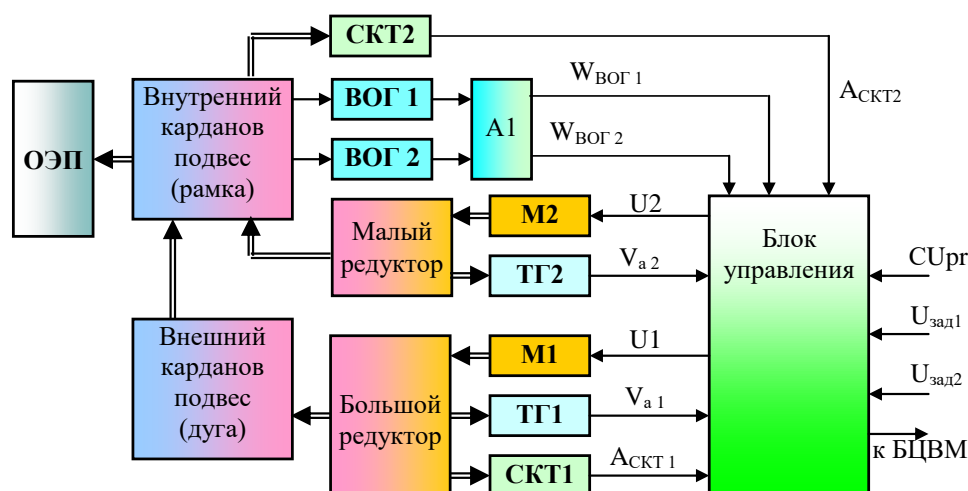


Рис. 1. Функциональная схема привода

На функциональной схеме используются следующие сокращения: А1 – масштабирующий усилитель сигналов ВОГ;  $W_{\text{ВОГ 1}}$ ,  $W_{\text{ВОГ 2}}$  – сигнал угловой скорости с

выхода ВОГ;  $V_{a1}$ ,  $V_{a2}$  – сигналы тахогенераторов, пропорциональные угловой скорости;  $A_{скт1}$ ,  $A_{скт2}$  – сигналы СКТ, пропорциональные угловым координатам;  $U1$ ,  $U2$  – сигнал управления двигателями по угловым координатам;  $U_{зад1}$ ,  $U_{зад2}$  – управляющий сигнал по углу с БЦВМ;  $CUpr$  – команда установки режима с БЦВМ.

Обобщенная блок-схема электроники привода представлена на рис. 2, из которого видно, что электромеханическая часть следящего координатора представляет собой систему автоматического управления с тремя кольцами обратной связи. На рис. 2 приняты обозначения: ЦОС – блок цифровой обработки; УН – усилители напряжения; УМ – усилители мощности; КФ – корректирующие фильтры; Р – редукторы.

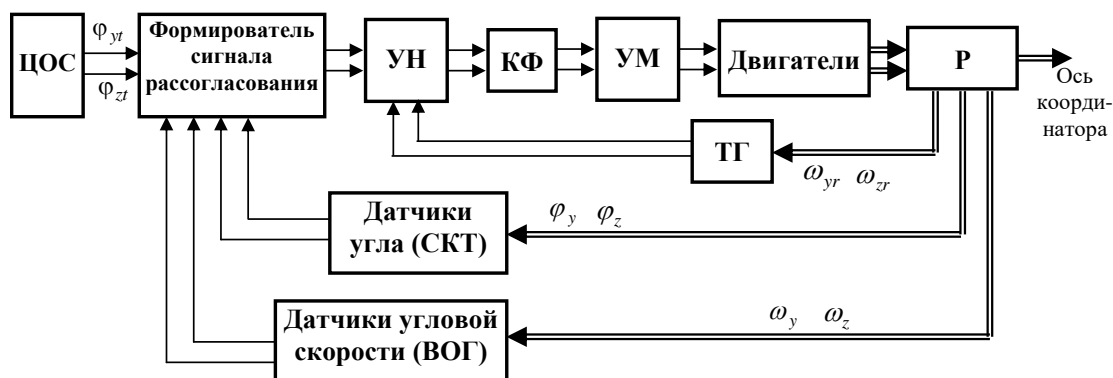


Рис. 2. Обобщенная блок-схема электроники привода

Работа следящего координатора сводится к следующему. Управляющие сигналы (сигналы по двум ортогональным каналам управления и пропорциональные угловому положению сопровождаемого объекта  $\varphi_{y1}$ ,  $\varphi_{z1}$ ) с выхода системы цифровой обработки сигналов (ЦОС) подаются на блок электроники следящего координатора, где сравниваются с сигналами датчиков координатора (угла и скорости поворота оси координатора). На основе сравнения этих сигналов формируется сигнал рассогласования, который характеризует отклонение оси координатора от направления на цель. Данное напряжение усиливается и подается на исполнительные двигатели до тех пор, пока сигнал рассогласования не станет равным нулю. Это будет свидетельствовать о том, что ось координатора совпадает с направлением на цель. Тахогенераторы определяют непосредственно скорость вращения исполнительных двигателей, а кольцо обратной связи, куда они входят, улучшает динамические характеристики подвеса.

### Динамическая модели процесса сопровождения цели

Для исследования эффективности работы привода необходима разработка динамической модели процесса сопровождения цели. Регулируемым параметром в системе сопровождения цели является угол отклонения оптической оси ОЭП от направления на цель, а управляющим воздействием (входным сигналом) – напряжение рассогласования, формируемое дискриминатором в двух плоскостях. По своей структуре система сопровождения – система автоматического регулирования с отрицательной обратной связью, поэтому проектирование и анализ таких систем выполняется на базе общей теории управления. Контур модели системы сопровождения цели с передаточными функциями звеньев, полученный в соответствии с кинематической схемой подвеса и обобщенной блок-схемой электроники подвеса, представлен на рис. 3 для одной угловой координаты.

Для систем с обратной связью важными аспектами выполнения целевой задачи является определение границ устойчивости работы (отсутствие самовозбуждения), а также количественная оценка ошибок управления, которые можно оценить по величине

$\Delta\varphi_y = \varphi_{yt} - \varphi_y$ . Для анализа динамической модели следящего координатора необходимо иметь передаточные функции  $W(s)$  отдельных звеньев системы управления ( $s$  – оператор преобразования Лапласа).

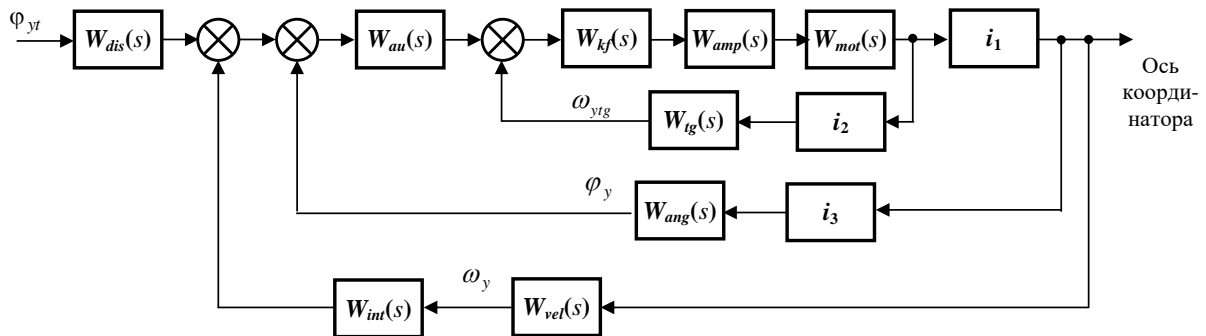


Рис. 3. Обобщенная динамическая модель координатора

Будем полагать, что в пределах изменения основных углов ориентации оптической оси ОЭП данные звенья являются линейными, тогда их можно описать с помощью передаточных функций:

$$W_{dis}(s) = \frac{k_{dis}}{1 + sT_{dis}} \text{ – передаточная функция дискриминатора } (k_{dis} = 1);$$

$$W_{au}(s) = \frac{k_{au}}{1 + sT_{au}} \text{ – передаточная функция усилителя напряжения};$$

$$W_{kf}(s) = \frac{k_{kf}}{1 + sT_{kf}} \text{ – передаточная функция корректирующего фильтра};$$

$$W_{amp}(s) = \frac{k_{amp}}{1 + sT_{amp}} \text{ – передаточная функция усилителя мощности};$$

$$W_{mot}(s) = \frac{k_{mot}}{s(1 + sT_{mot})} \text{ – передаточная функция исполнительного двигателя};$$

$$W_{tg}(s) = \frac{k_{tg}}{1 + sT_{tg}} \text{ – передаточная функция тахогенератора (ТГ).}$$

$$W_{ang}(s) = \frac{k_{ang}}{1 + sT_{ang}} \text{ – передаточная функция датчика угла поворота (СКТ)};$$

$$W_{vel}(s) = \frac{k_{vel}}{1 + sT_{vel}} \text{ – передаточная функция датчика угловой скорости (ВОГ)};$$

$$W_{int}(s) = \frac{k_{int}}{s} \text{ – передаточная функция интегратора.}$$

Редуктор характеризуется передаточным числом  $i$ .

Здесь  $k_{dis}$ ,  $k_{au}$ ,  $k_{kf}$ ,  $k_{amp}$ ,  $k_{mot}$ ,  $k_{tg}$ ,  $k_{ang}$ ,  $k_{vel}$ ,  $k_{int}$  – коэффициенты передачи дискриминатора со схемой обработки, усилителя напряжения, корректирующего фильтра, усилителя мощности, двигателя, тахогенератора, датчика угла поворота, датчика угловой скорости, интегратора;  $T_{dis}$ ,  $T_{au}$ ,  $T_{kf}$ ,  $T_{amp}$ ,  $T_{mot}$ ,  $T_{tg}$ ,  $T_{ang}$ ,  $T_{vel}$  – постоянные времени дискриминатора, усилителя напряжения, корректирующего фильтра, усилителя мощности, двигателя, тахогенератора, датчика угла поворота, датчика угловой скорости соответственно.

Передаточную функцию внутренней цепи сигнала ошибки системы сопровождения по угловой скорости, измеренной тахогенератором, можно записать в виде

$$W_0(s) = \frac{W_{kf}(s) \cdot W_{amp}(s) \cdot W_{mot}(s)}{1 + W_{kf}(s) \cdot W_{amp}(s) \cdot W_{mot}(s) \cdot W_{tg}(s)/i_2}.$$

Следующее кольцо обратной связи по углу поворота, включающее СКТ, дает передаточную функцию вида

$$W_1(s) = \frac{W_{au}(s) \cdot W_0(s)/i_1}{1 + W_{au}(s) \cdot W_0(s) \cdot W_{ang}(s)/(i_1 i_3)}.$$

С учетом внешнего кольца передаточная функция приобретает вид

$$W_2(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_{vel}(s) \cdot W_1(s)}.$$

На основании этого передаточная функция всего устройства может быть записана

$$W_{total}(s) = W_{dis}(s) \cdot W_2(s).$$

Для оценки качества регулирования используются ошибки  $\Delta\varphi_y = \varphi_{yt} - \varphi_y$ , а также траектории изменения выходных данных  $\varphi_y$ ,  $\omega_y$  в сравнении с входным (управляющим) воздействием  $\varphi_{yt}$  и скорость его изменения  $\omega_{yt}$ . Взаимосвязь между входным воздействием и выходным откликом определяется соотношением  $\varphi_y = \varphi_{yt} W_{ext}(s)$ . Тогда сигнал рассогласования (ошибка управления) равен

$$\Delta\varphi_y = \varphi_{yt} - \varphi_y = \varphi_{yt} [1 - W_{ext}(s)].$$

Если рассматривать  $\Delta\varphi_y$  как функцию времени, то получим динамическую ошибку системы, анализ которой может помочь количественно оценить качество работы системы сопровождения в целом. Аналогичным способом получены передаточные функции (характеристики) для всех основных режимов работы: режима целеуказания, сопровождения по углу, стабилизации.

### Моделирование основных узлов гироспривода

Следящая система работает в условиях действия ряда возмущающих воздействий (помех), основными из которых являются тепловые шумы ОЭП, фоновый шум, которые приводят к ошибкам измерения координат, а также преднамеренные и непреднамеренные помехи. В общем случае модель сигнала, поступающего на вход системы управления, представляет аддитивную смесь

$$\varphi_{yt} = \varphi_{tag y} + \xi_{\varphi y},$$

где  $\varphi_{tag y}$  – угловая траектория движения цели относительно носителя;  $\xi_{\varphi y}$  – случайные ошибки измерения угловых координат.

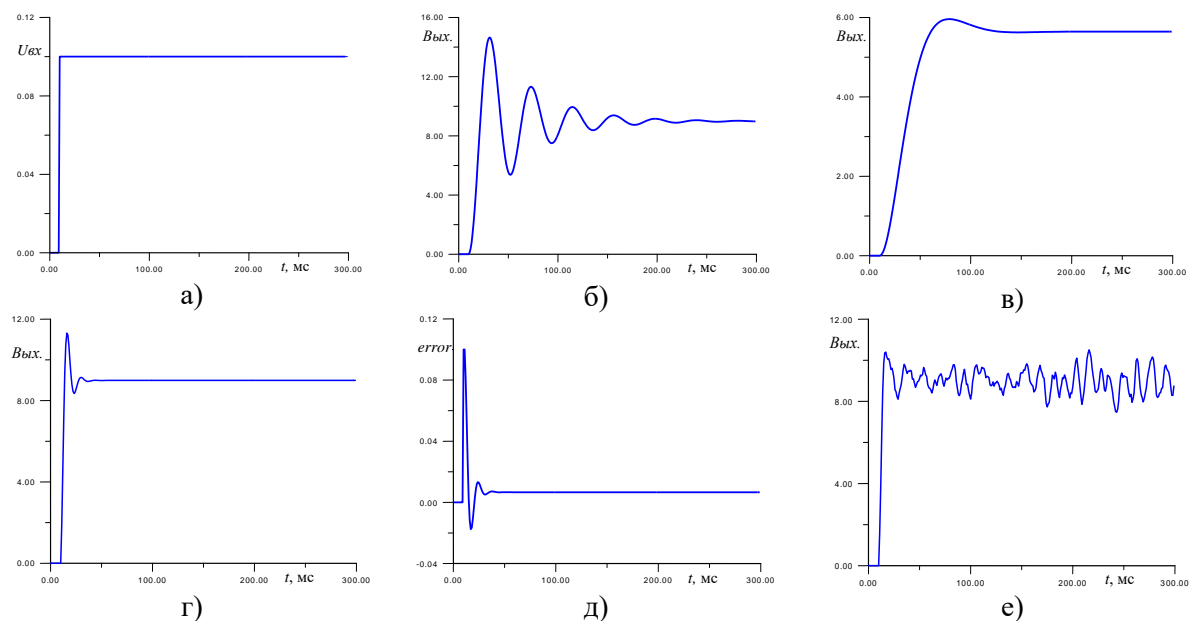
Кроме помех, имеющих электрическое происхождение, на привод воздействуют механические помехи, вызванные работой двигателей носителя и его движением в нестационарной среде. К таким помехам могут быть отнесены вибрации, ударные нагрузки, ускорения и другие перегрузки. Для таких помех привод выступает как компенсатор [7].

Первое внутренне кольцо обратной связи в системе автоматического управления двигателями содержит тахогенератор, который является датчиком угловой скорости вращения. Представим передаточную функцию в виде произведения передаточных функций двух звеньев: форсирующего (пропорционально-дифференцирующего) звена

и апериодического звена  $W_{corr}(s) = (T_d s + 1) \cdot \frac{1}{T_a s + 1}$ . Пропорциональная часть

форсирующего звена отвечает за текущее значение ошибки, дифференцирующая часть форсирующего звена отслеживает тенденцию изменения ошибки, а апериодическая часть сглаживает высокочастотные шумы и накапливает (усредняет) предыдущие значения ошибок. На рис 4 представлены основные осциллограммы, полученные на модели устройства управления двигателем с тахогенератором. Основное внимание было уделено влиянию компонентов корректирующего фильтра на динамику работы двигателя. В качестве входного воздействия взята ступенчатая функция (функция Хэвисайда, рис. 4а), реакция на которую показывает переходную функцию системы регулирования. При отключении дифференциальной составляющей в корректирующем фильтре и при большом коэффициенте усиления прямой ветви ( $W_{pre}(s)=10$ ) получаем выходной эффект, представленный на рис. 4б. Как видим, переходный процесс имеет колебательный характер, величина перерегулирования составляет порядка 50%, а длительность процесса регулирования (время вхождения в диапазон  $\pm 5\%$  от установившегося значения) составляет около 180 мс. Такие параметры использовать нельзя, поскольку процесс отработки управляющего напряжения затянут, а колебания оси ОЭН могут привести к срыву сопровождения или наведения. Улучшить систему управления можно использованием апериодического режима. На рис. 4в приведен выходной эффект при снижении в 10 раз коэффициента усиления прямой ветви ( $W_{pre}(s)=1$ ). График показывает, что степень перерегулирования существенно снизилась (до 6,7%), но длительность переходного процесса еще осталась значительной (порядка 50 мс).

Подключим дифференциальный компонент форсирующего звена при  $W_{pre}(s)=10$ . Выходной эффект от этого подключения представлен на рис. 4г. Подключение дифференциатора позволило существенно уменьшить длительность переходного процесса – длительность фронта стала порядка 7 мс, однако максимальный уровень перерегулирования возрос на 5%. При этом в выходном эффекте появилась колебательность, которая в отличие от рис. 4б быстро затухает и после одного периода укладывается в пяти процентную трубку регулирования.



**Рис. 4. Основные осциллограммы устройства управления двигателем с тахогенератором:**  
 а) входное воздействие; б) выходной эффект при большом коэффициенте усиления прямой ветви ( $\kappa = 10$ ); в) выходной эффект при сниженном в 10 раз коэффициенте

усиления прямой ветви ( $\kappa = 1$ ); г) дифференциальный компонент подключен ( $\kappa = 10$ ); д) сигнал ошибки; е) выходной эффект при наличии шума на входе

На рис. 4е представлена реакция системы на ступенчатое входное воздействие с отношением сигнал-шум по напряжению  $q_{in} = U/\sigma = 20$  дБ. Измерения показывают, что отношение сигнал-шум на выходе стало равным  $q_{out} = 33$  (30,5 дБ). Кроме того, следует отметить, что шум на выходе стал сглаженным, коррелированным, поэтому он в меньшей степени изнашивает механические узлы. Таким образом, гирос привод с тахогенератором осуществляет подавление помехи по угловой скорости на 10 дБ.

При работе гирос привода в режиме углового сопровождения в качестве измерителя углового положения рамки и дуги гирос привода используются синусно-косинусные трансформаторы. Они входят во второе кольцо обратной связи и работают по интегрированной скорости вращения (по углу поворота). Структурная кинематическая схема подключения СКТ приведена на рис. 5.

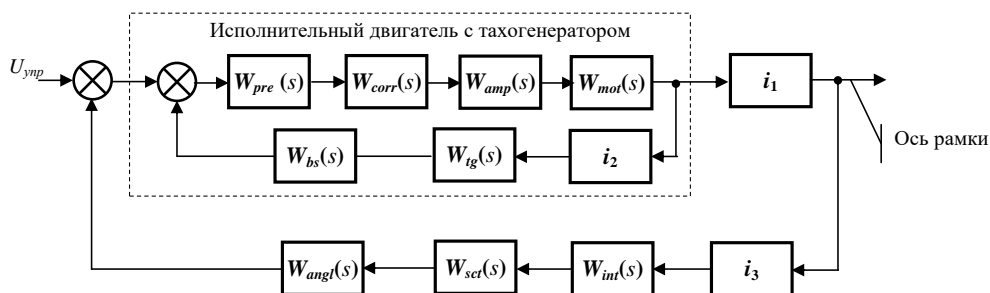


Рис. 5. Структурная схема контура управления с СКТ

На рис. 6 приведены основные осциллограммы схемы для коэффициента усиления в кольце обратной связи управления по углу (усилитель после СКВТ)  $W_{angl}(s) = 0,01$  при входном воздействии в виде ступеньки. Физически это означает установку рамки в другое фиксированное угловое положение. На рис. 6а приведен график зависимости угловой скорости от времени, который показывает, что сначала двигатель вращался с максимальной скоростью, а затем его скорость упала до нуля (двигатель остановился). На рис. 6б представлен график установки углового положения. Из графика видно, что процесс отработки угла является аperiodическим, время регулирования (длительность фронта) составляет 120 мс. На рис. 6в показан процесс изменения ошибки на входе прямого канала регулирования. В начале, когда поступил скачок напряжения, ошибка достигла максимального значения, а затем она плавно снизилась до нуля. Эта зависимость также подтверждает аperiodический характер регулирования.

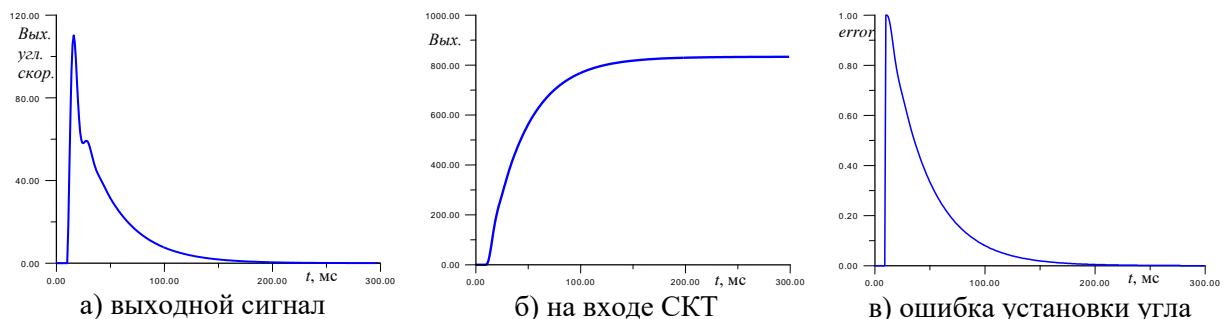


Рис. 6. Основные осциллограммы схемы в режиме углового сопровождения

Эффективным способом уменьшения длительности переходного процесса является увеличение коэффициента усиления  $W_{angl}(s)$ . На рис. 7 приведены базовые зависимости

при использовании  $W_{angl}(s) = 0,045$ , который соответствует критическому режиму авторегулирования. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит появлению большой колебательности в процессе установки угла и затягиванию переходного процесса.

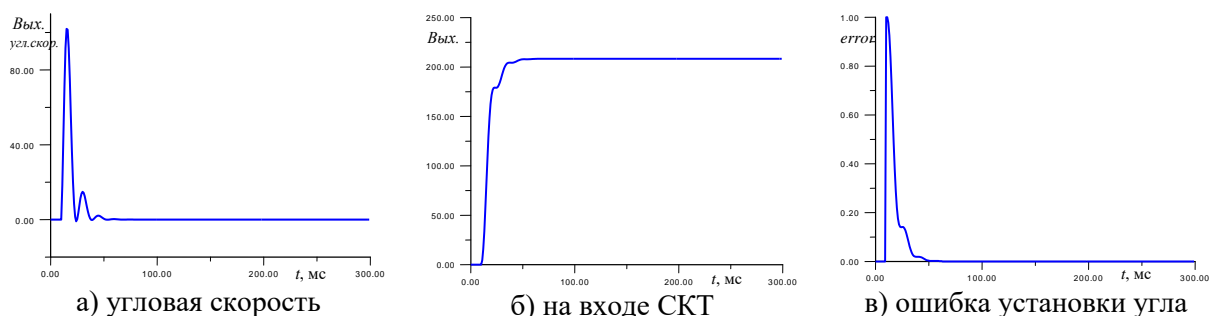


Рис. 7. Основные осциллограммы схемы для коэффициента усиления в кольце обратной связи управления по углу  $W_{angl}(s) = 0,045$

Небольшие колебания скорости в заключительной фазе регулирования видны на рис. 7а, однако в течение 30...40 мс они затухают. Длительность переходного процесса составляет 30 мс. При подаче на вход зашумленных данных на выходе системы управления также появляется флюктуационная составляющая. Если на вход подано управляющее напряжение с отношением сигнал-шум 20 дБ, то на выходе отношение сигнал-шум составляет 34,7 дБ, т.е. широкополосный шум был подавлен на 14,7 дБ.

При работе гиросприода с волоконно-оптическими гироскопами, которые определяют угловую скорость вращения рамки в двух плоскостях, организуется третье кольцо обратной связи. Структурная кинематическая схема подключения ВОГ приведена на рис. 8.

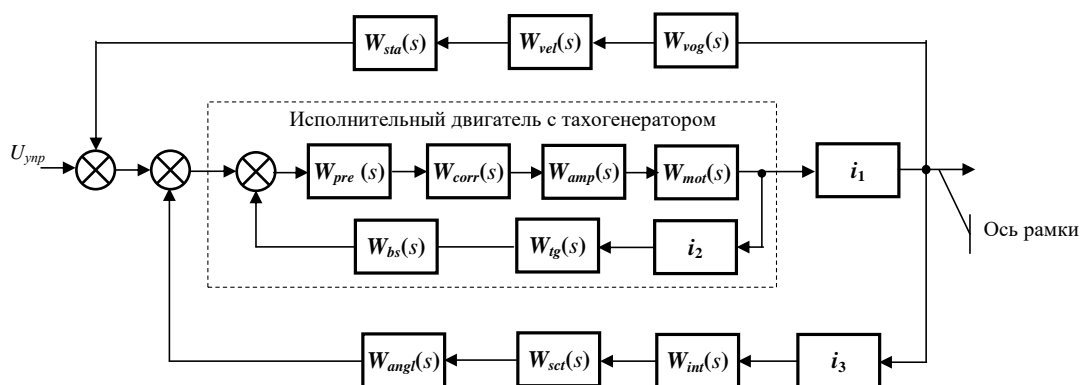
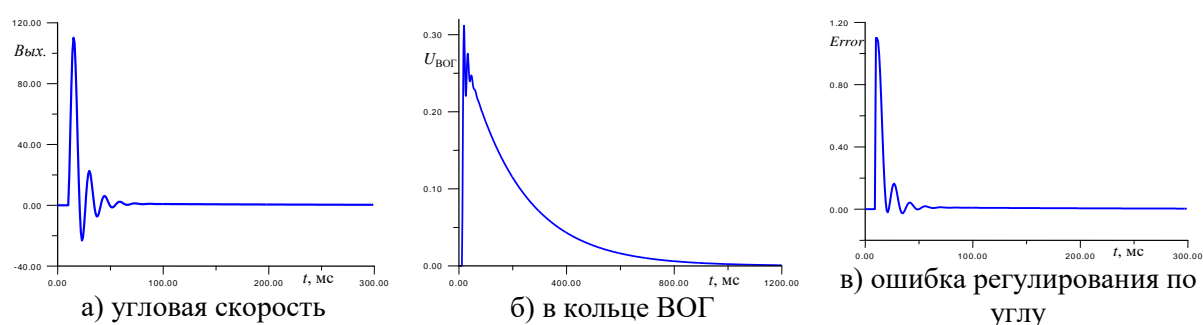


Рис. 8. Структурная схема контура управления с ВОГ

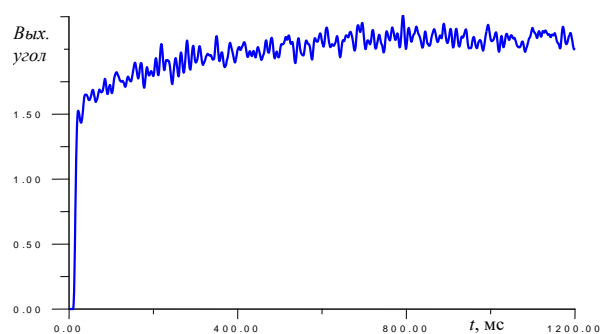
ВОГ является широкополосным измерителем угловой скорости (рабочая полоса частот 0...1 кГц), поэтому его можно считать пропорциональным звеном. Блок с передаточной функцией  $W_{sta}(s)$  является фильтром коррекции и служит для формирования требуемых амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик и обеспечивает устойчивость работы контура стабилизации. При проведении моделирования использовалась передаточная функция в виде произведения передаточных функций форсирующего и апериодического звена. Блок с передаточной функцией  $W_{vel}(s)$  является нормирующим усилителем с ориентировочными значением  $W_{vel}(s) = 15$ .



На рис. 9, 10 представлены характерные зависимости в элементах гиросприода при подключении внешнего кольца обратной связи, включающего ВОГ. График рис. 9а показывает, что подключение кольца обратной связи с ВОГ с выбранными параметрами привело к появлению дополнительного колебания значения угловой скорости, но в целом процесс отработки углового рассогласования прошел устойчиво. Рис. 9б характеризует процесс установления стационарного режима в гиросприоде с участием кольца обратной связи по ВОГ. График показывает, что переходной процесс в кольце обратной связи по угловой скорости имеет большую длительность (около 1 с). Такое переходное время обязано фильтру коррекции, который обладает большой инерционностью (большой постоянной времени) по сравнению с другими фильтрующими звеньями гиросприода. Подключение кольца с ВОГ также несколько изменило структуру сигнала ошибки (управляющего сигнала). Ошибка управления угловой скоростью имеет некоторую колебательность, но к окончанию переходного процесса стремится к нулю. В следующем управляющем сигнале (на выходе 2-го вычитающего устройства, рис. 9в) ошибка управления по углу имеет меньшую колебательность, но по сравнению с рис. 7в колебания остаются заметными. Это свидетельствует о том, что в системе управления по сигналам ВОГ присутствует некоторое перерегулирование, поэтому коэффициент усиления нормирующего усилителя  $W_{vel}(s)$  может быть уменьшен.



**Рис. 9. Основные характеристики системы с кольцом ВОГ**



**Рис. 10. Выходной отклик привода по угловой координате**



**Рис. 11. Макет следящего координатора**

Некоторые детали по характеристикам качества работы привода в режиме стабилизации платформы можно получить из графика рис. 10, где приведена одна реализация выходного отклика привода на скачкообразное управляющее воздействие и широкополосный шум. Отношение сигнал-шум на входе составляло 20 дБ, измеренное отношение сигнал-шум на выходе равно 38,1 дБ. Отсюда видно, что введение кольца регулирования с использованием ВОГ дает дополнительное подавление помехового воздействия на 4 дБ, а с учетом других звеньев – на 18 дБ.

Внешний вид макета следящего координатора приведен на рис. 11.

## **Выводы**

Рассмотрена кинематическая модель и динамическая модель гироспривода, на основе которых проведено исследование ряда свойств привода как системы автоматического регулирования. На основании рассмотренных моделей разработаны функциональная схема привода, блок-схема электроники управления и реализован макет координатора.

Проведено исследование общих вопросов функционирования привода и его основных характеристик. Показано, что система сопровождения обладает свойством компенсации помех в условиях действия ряда возмущающих воздействий (внешних помех). Использование кольца управления с тахогенератором позволяет повысить помехоустойчивость на 10 дБ, а при подключении кольца обратной связи по угловой координате обеспечивается подавление помех более чем на 14 дБ.

Развязка сигнала угловой скорости линии «цель-носитель» от колебаний корпуса носителя при замкнутом контуре сопровождения цели и при полосе пропускания контура 2,0 Гц составляет 0,0018...0,025 для диапазона частот 0,5...5,0 Гц.

Таким образом, разработанная имитационная модель позволяет провести оценку точности в режимах сопровождения цели и стабилизации пространственного положения оптической оси ОЭП. Гироспривод помогает сглаживать траекторные измерения и участвует в процедуре снижения погрешности оценивания угловых координат цели. Проведенный расчет, моделирование основных режимов работы гироспривода и реализация в макете позволяет сделать вывод об устойчивой работе координатора.

## **Литература**

1. Криксунов Л.З., Усольцев И.Ф. Инфракрасные устройства самонаведения управляемых снарядов. М.: Сов. радио, 1963.
2. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. М.: Воениздат, 1970.
3. Бурдинов К.А., Шашкина К.М., Шагхаев Э. Исследование системы автоматического управления стабилизации изображения бортовых оптико-электронных приборов наведения и слежения // Advanced Engineering Research. 2022. Т.22. № 2. С.150-160.
4. Обносков Б.В., Очковский А.А. Оптимизация параметров координатора цели телевизионной системы наведения управляемой авиационной бомбы // Труды МАИ. 2012. Вып. 59. С.1-13.
5. Солонар А.С. и др. Оптико-локационный координатор системы самонаведения беспилотного летательного аппарата // Доклады БГУИР. 2018. Т.113. №3. С.19-25.
6. Патент РФ 2644991. Координатор головки самонаведения // Коротков О.В., Горчаков И.М., Комиссаров К.В. / АО «МКБ «Компас». Заявка: 2016134524, 24.08.2016. Опубл. 15.02.2018. Бюл. № 5.
7. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника, 2014.