

**В. В. Матвеев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., matweew.valery@yandex.ru,

**Е. Ю. Кисловский**<sup>2</sup>, инженер-конструктор, kislovskiy@bk.ru,

**Д. Н. Мильченко**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, зам. генерального директора по НИР и ОКР, dim2001@mail.ru,

**В. Я. Распопов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., tgupu@yandex.ru,

**С. В. Телухин**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., tgupu@yandex.ru,

**М. Г. Погорелов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., mgpogoreloff@yandex.ru,

**В. В. Лихошерст**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., lvv\_01@inbox.ru,

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тульский государственный университет", г. Тула,

<sup>2</sup> Акционерное общество "Азовский оптико-механический завод", г. Азов

## Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах

*Анализируется система сопровождения подвижных объектов на основе двухосного карданова подвеса с МЭМС-гироскопами в контуре управления. Рассматривается кинематика системы сопровождения в одной из плоскостей наведения. Приведена структурная схема одного канала системы сопровождения, состоящая из контуров коррекции и стабилизации. Показано, что время переходного процесса, полоса пропускания, фазовое запаздывание между угловыми скоростями сопровождаемого объекта и платформы в значительной степени определяется добротностью по скорости контура коррекции. Приведенные числовые оценки дают представление о характеристиках системы сопровождения. Даны соотношения, позволяющие оценить влияние шума МЭМС-гироскопа на угловую скорость стабилизируемой платформы. Поясняется возникновение синхронных погрешностей системы сопровождения на колеблющемся носителе. Показано, что влияние сил сухого трения в осях подвеса на систему сопровождения эквивалентно действию суммы гармоник с частотами, кратными частоте колебаний носителя с нечетными коэффициентами. Иллюстрируется действие момента сил вязкого трения в условиях колебаний носителя. Представлена экспериментальная спектральная характеристика макета системы сопровождения на качающемся стенде, подтверждающая теоретические выводы. Приведено аналитическое соотношение, позволяющее оценить относительную синхронную погрешность системы сопровождения.*

**Ключевые слова:** система сопровождения, МЭМС-гироскоп, гиросtabilизированная платформа, синхронная погрешность

### Введение

В настоящее время повышаются требования к системам автоматического сопровождения подвижных объектов, являющихся источниками излучения в различных диапазонах (оптическом, инфракрасном, радиолокационном). Координаторы (датчики излучения) устанавливаются на двух- или трехосные гиросtabilизированные платформы, решающие задачу пространственной развязки оси равносигнальной зоны (ОРЗ) координатора от колебаний носителя и осуществляющие непрерывное ее совмещение с направлением на сопровождаемый объект (СО). В зависимости от решаемой задачи закон движения СО описывается детерминированными функциями времени, либо имеет случайный характер с заданными характеристиками [1].

Развитие в последнее время гироскопов, выполненных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), открывает перспективу их применения в системах стабилизации и автосопровождения подвижных объектов [2]. МЭМС-гироскопы позволяют сформировать обратную связь по угловой скорости стабилизируемой платформы, улучшая тем самым ее динамические характеристики.

Целью настоящей статьи является анализ системы автосопровождения подвижного объекта на базе МЭМС-гироскопа.

### Кинематика системы автосопровождения

Платформа (рис. 1) имеет две степени свободы относительно носителя: вращение вместе с рамой вокруг оси  $Y$  и собственное вращение

вокруг оси  $Z$ . На платформе установлен координатор, ОРЗ которого направлена вдоль оси  $X_{\Pi}$  платформы, который вырабатывает сигналы, пропорциональные углам отклонения  $\Delta_y$  и  $\Delta_z$  от ОРЗ. На платформе смонтирован инерциальный измерительный модуль (ИИМ), включающий два МЭМС-гироскопа, измеряющих проекции вектора абсолютной угловой скорости платформы  $\omega_y$  и  $\omega_z$  на связанные с ней оси. Информация об угловой скорости платформы и углах рассогласования поступает в вычислительно-преобразующее устройство, формирующее сигналы управления, подаваемые на двигатели стабилизации.

Кинематика системы автосопровождения в одной из плоскостей иллюстрируется рис. 2, на котором ось  $OX_H$  — продольная ось носителя, вращающаяся в инерциальном пространстве с угловой скоростью  $\omega_H$ .

ОРЗ повернута относительно продольной оси носителя  $OX_H$  на угол  $\varphi$  и вращается с абсолютной угловой скоростью  $\omega_{\Pi}$ . Ось  $OX_{CO}$ , направленная на СО, вращается с угловой скоростью  $\omega_{CO}$  и повернута относительно оси  $OX_{\Pi}$  на угол рассогласования  $\Delta$  (здесь и далее индексы  $x$  и  $y$ , характеризующие принадлежность к тому или иному каналу, опущены).

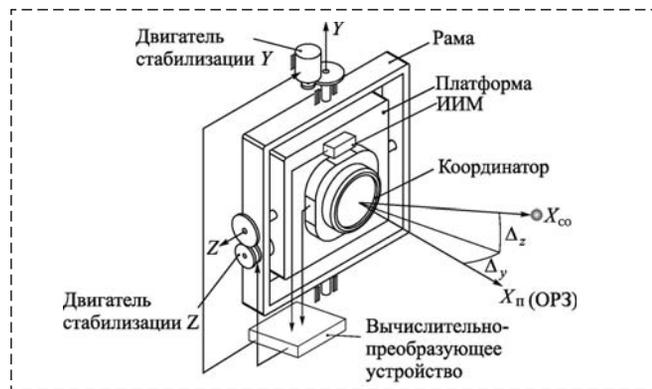


Рис. 1. Электрокинематическая схема двухосевой системы сопровождения

Fig. 1. Electro-kinematic scheme of two-axis tracking system

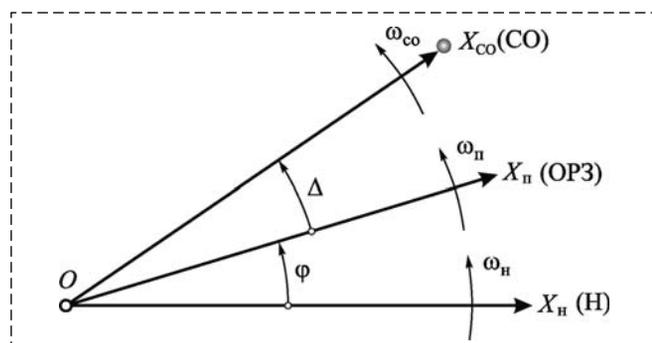


Рис. 2. Кинематика сопровождения в одной из плоскостей наведения

Fig. 2. Kinematics of support in one of the planes of guidance

Из рис. 2 следуют кинематические соотношения между угловыми скоростями:

$$\dot{\Delta} = \omega_{CO} - \omega_{\Pi}, \quad \dot{\varphi} = \omega_{\Pi} - \omega_H.$$

Математическая модель системы сопровождения по одному из каналов может быть упрощенно описана следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} J_0 \dot{\omega}_{\Pi} &= M_{упр} - M_0 \text{sign} \dot{\varphi} - d \dot{\varphi}; \\ \dot{\varphi} &= \omega_{\Pi} - \omega_H; \\ \dot{\Delta} &= \omega_{CO} - \omega_{\Pi}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $M_0$  — модуль момента сил сухого трения;  $d$  — коэффициент вязкого трения [Н·м·с];  $J_0$  — момент инерции системы, приведенный к оси вращения платформы;  $M_{упр}$  — момент управления.

В практике расчета систем стабилизации и сопровождения момент сил сухого трения при колебаниях основания рассматривают как возмущающий. Так как обычно  $|\omega_{\Pi}| \ll |\omega_H|$ , то имеем [3]:

$$-M_0 \text{sign} \dot{\varphi} = -M_0 \text{sign}(\omega_{\Pi} - \omega_H) \approx M_0 \text{sign} \omega_H.$$

Формируя момент управления платформой пропорционально разности заданной угловой скорости платформы  $\omega_3$ , линейно зависящей от угла рассогласования  $\Delta$ , и фактической угловой скорости платформы  $\omega_{\Pi}$ , измеренной МЭМС-гироскопом, имеем операторное представление математической модели (1):

$$\left. \begin{aligned} J_0(s+d)\omega_{\Pi}(s) &= \\ &= M_{упр}(s) - M_0 L[\text{sign} \omega_H] + d\omega_H(s); \\ M_{упр}(s) &= \\ &= W_p(s)W_{\Phi}(s)\{k_e \omega_3(s) - k_r[\omega_{\Pi}(s) + v(s)]\}; \\ \omega_3(s) &= Q\Delta(s); \\ s\Delta(s) &= \omega_{CO}(s) - \omega_{\Pi}(s), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $W_p(s)$  — передаточная функция разгрузочного устройства, включающего усилитель мощности, двигатель, редуктор;  $W_{\Phi}(s)$  — передаточная функция фильтра, улучшающего динамику контура сопровождения;  $k_e$  — коэффициент передачи контура управления [В/(рад/с)];  $k_r$  — коэффициент передачи МЭМС-гироскопа [В/(рад/с)];  $Q$  — добротность по скорости контура управления [1/с];  $v(s)$ ,  $L[\text{sign} \omega_H]$ ,  $\omega_3(s)$  — изображения по Лапласу инструментальных погрешностей МЭМС-гироскопа, функции  $\text{sign} \omega_H$  и заданной угловой скорости соответственно.

На рис. 3 приведена структурная схема одного канала системы сопровождения. Координатор измеряет угол рассогласования  $\Delta$  между линией  $OX_{CO}$  и ОРЗ, который в вычисли-

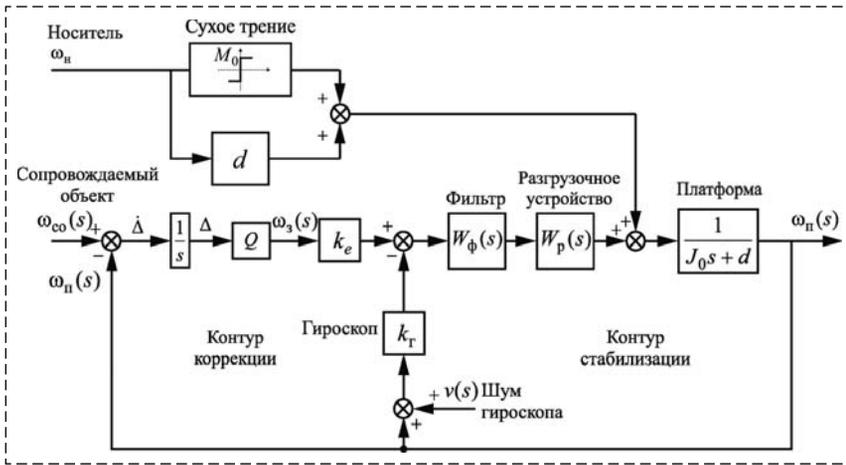


Рис. 3. Структурная схема системы сопровождения  
Fig. 3. Block diagram of the tracking system

тельно-преобразующем тракте умножается на добротность контура автосопровождения  $Q$ , формируя тем самым заданную угловую скорость платформы  $\omega_3$ . Последняя преобразуется посредством коэффициента передачи  $k_e$  и сравнивается с сигналом, несущим информацию о фактической угловой скорости платформы, измеренной МЭМС-гироскопом с коэффициентом передачи  $k_r$ .

Полученная таким образом разность напряжений фильтруется и подается в разгрузочное устройство, придающее платформе с установленным на ней координатором угловую скорость  $\omega_n$ . Как видно из структурной схемы, приведенной на рис. 3, система содержит два взаимосвязанных контура: коррекции, осуществляющего слежение за СО, и стабилизации, стремящегося сохранить положение платформы при действии на нее возмущающих моментов.

### Передаточные функции системы сопровождения

Передаточная функция замкнутой системы сопровождения, в которой входным сигналом является угловая скорость СО, а выходным — угловая скорость платформы  $\omega_n$ , в предположении  $W_\phi(s) = 1$ ,  $W_p(s) = k_p$  имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n(s)}{\omega_{CO}(s)} = \frac{Qk_e k_p}{J_0 s^2 + (d + k_r k_p)s + Qk_e k_p}. \quad (2)$$

Если положить равенство коэффициентов

$$k_r = k_e, \quad (3)$$

то в установившемся режиме ( $s = 0$ ) имеем

$$\omega_n = \omega_{CO},$$

т. е. угловая скорость ОРЗ будет равна угловой скорости оси  $OX_{CO}$ .

Корни знаменателя передаточной функции (2) с высокой степенью точности определяются следующими зависимостями:

$$s_1 \approx \frac{d + k_r k_p}{J_0}, \quad s_2 \approx Q.$$

Первый из корней описывает динамику контура стабилизации, а второй — контура коррекции, причем

$$s_1 \gg s_2. \quad (4)$$

С учетом неравенства (4) и соотношения (3) передаточная функция (2) может быть приближенно представлена в виде

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n(s)}{\omega_{CO}(s)} \approx \frac{1}{\frac{1}{Q}s + 1}.$$

Таким образом, процесс сопровождения приближенно описывается передаточной функцией аperiodического звена первого порядка с постоянной времени  $1/Q$ . Реакция на постоянную входную угловую скорость  $\omega_{CO}$  определяется соотношением

$$\omega_n(t) = (1 - e^{-Qt})\omega_{CO}(t),$$

из которого следует, что динамика сопровождения в значительной степени определяется добротностью  $Q$ .

Передаточная функция по углу рассогласования также может быть приближенно описана аperiodическим звеном первого порядка с передаточной функцией

$$\Phi_\Delta(s) = \frac{\Delta(s)}{\omega_{CO}(s)} \approx \frac{1/Q}{\left(\frac{1}{Q}s + 1\right)}. \quad (5)$$

Анализ соотношения (5) позволяет сделать вывод, что динамика угла рассогласования в первом приближении полностью определяется добротностью контура коррекции и при  $\omega_{CO} = \text{const}$  описывается соотношением

$$\Delta(t) \approx \frac{1}{Q}(1 - e^{-Qt})\omega_{CO}.$$

В установившемся режиме угол рассогласования определяется зависимостью

$$\Delta \approx \frac{\omega_{CO}}{Q},$$

которая показывает, что в сигнале  $\Delta$  содержится информация об угловой скорости оси  $OX_{CO}$ . Таким образом, если угловая скорость линии  $OX_{CO}$  составляет  $50 \text{ }^\circ/\text{с}$ , то при добротности, например,  $Q = 50 \text{ с}^{-1}$  угол рассогласования будет равен  $1^\circ$ .

Переходный процесс у апериодического звена первого порядка заканчивается за время, примерно равное трем постоянным времени, поэтому

$$t_{п.п} \approx 3/Q.$$

Следовательно, для повышения быстродействия необходимо увеличивать добротность контура коррекции.

Полоса пропускания системы сопровождается также определяется добротностью системы и при неравномерности амплитудной частотной характеристики (АЧХ) не более 3 дБ определяется зависимостью

$$\Delta\omega \approx Q \text{ [рад/с]}.$$

Сдвиг фаз между угловой скоростью  $OX_{CO}$  и угловой скоростью платформы приближенно определяется соотношением

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega/Q).$$

Из полученного соотношения следует, что сдвиг фаз между угловой скоростью платформы и сопровождаемым объектом уменьшается при увеличении добротности и увеличивается с повышением частоты колебаний линии  $OX_{CO}$ . Если последняя совершает колебания, например, с частотой 3 Гц, то фазовое запаздывание составит  $\approx 21^\circ$ .

Передаточная функция, связывающая угловую скорость платформы  $\omega_{п}$  с возмущающим моментом  $M_{в}$ , в предположении  $W_{\phi}(s) = 1$ ,  $W_p(s) = k_p$ ,  $k_r = k_e$ , имеет вид

$$\Phi_M(s) = \frac{\omega_{п}(s)}{M_{в}(s)} = \frac{s}{J_0 s^2 + (d + k_r k_p)s + Q k_r k_p}. \quad (6)$$

Из передаточной функции (6) следует, что постоянный возмущающий момент не вызовет погрешности в угловой скорости платформы  $\omega_{п}$ .

### Влияние шума МЭМС-гироскопа

Известно [2], что МЭМС-гироскопы являются датчиками низкого класса точности, поэтому оценка влияния их инструментальных погрешностей, в частности шума, на угловую скорость платформы является важной задачей.

Случайные погрешности МЭМС-гироскопов чаще всего описываются моделью белого шума, параметры которого задаются так называемым случайным блужданием угла (*Angle Random Walk, ARW*), имеющим размерность рад/ $\sqrt{\text{с}}$ . Характеристика *ARW* имеет смысл корня квадратного из спектральной плотности шума, т. е.  $S_r(\omega) = ARW^2$ .

Передаточная функция замкнутой системы, в которой входом является инструментальная погрешность гироскопа  $v$ , а выходом — угловая скорость платформы  $\omega_{п}$ , имеет вид

$$\Phi_{\omega_{п}}(s) = \frac{\omega_{п}(s)}{v(s)} = -\frac{k_r k_p s}{J_0 s^2 + (d + k_r k_p)s + Q k_e k_p}. \quad (7)$$

Из передаточной функции (7) следует, что система сопровождения является статической, поэтому среднеквадратическое отклонение (СКО) угловой скорости платформы  $\omega_{п}$ , вызванное шумом гироскопа, можно оценить по известному соотношению из теории случайных процессов:

$$\sigma_{\omega_{п}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_{\omega_{п}}(j\omega)|^2 S_r(\omega) d\omega}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{\omega_{п}}$  — СКО угловой скорости платформы;  $S_r(\omega)$  — спектральная плотность шума МЭМС-гироскопа.

Вычисляя соотношение (8), имеем СКО угловой скорости платформы, вызванное шумом МЭМС-гироскопа,

$$\sigma_{\omega_{п}} = ARW \sqrt{\frac{(k_r k_p)^2}{2J_0(d + k_r k_p)}} \approx ARW \sqrt{\frac{k_r k_p}{2J_0}}.$$

Полученное соотношение позволяет оценить СКО случайных колебаний платформы, вызванных шумом гироскопа. Понятно, что с увеличением момента инерции платформы такие случайные колебания будут ослабляться. Если, например, шум МЭМС-гироскопа составляет  $ARW = 0,01 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{с}}$ , а параметры системы такие, что  $J_0 = 0,001 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $k_p = 4 \text{ Н}\cdot\text{м/В}$ ,  $k_r = 0,6 \text{ В/рад/с}$ , то СКО угловой скорости платформы составит  $\sigma_{\omega_{п}} \approx 0,3 \text{ }^\circ/\text{с}$ .

Аналогично может быть оценено влияние шума гироскопа на угол рассогласования системы сопровождения:

$$\sigma_{\Delta} \approx ARW \sqrt{\frac{1}{2Q}}.$$

При таком же уровне шума МЭМС-гироскопа и добротности  $50 \text{ с}^{-1}$  СКО угла рассогласования составит  $0,06^\circ$ .

## Синхронные погрешности системы сопровождения

Под действием всевозможных периодических возмущений носитель совершает угловые колебания вокруг своего центра масс, которые приводят к появлению так называемых синхронных погрешностей (ошибок) системы сопровождения [4]. Воздействие синхронной погрешности в контуре стабилизации носителя эквивалентно действию дополнительной положительной обратной связи по угловой скорости носителя. Эта обратная связь снижает демпфирование контура управления носителем, а в некоторых случаях может привести к его неустойчивости [5], поэтому определение синхронных погрешностей систем сопровождения является немаловажной задачей. В работе предложен спектральный подход для исследования таких погрешностей.

Возникновение синхронных погрешностей связано с тем, что в процессе колебаний носителя имеет место "захват" платформы моментами сил сухого и вязкого трения, в результате чего в определенные моменты времени платформа движется как единое целое с колеблющимся носителем. Для примера на рис. 4 (см. третью сторону обложки) приведены графики угловой скорости платформы макетного образца системы сопровождения на качающемся основании с амплитудой 100 %/с и частотой 2,44 Гц.

В сигнале угловой скорости платформы хорошо наблюдаются моменты "захвата" платформы силами трения в моменты перехода угловой скорости стенда через ноль, что соответствует его максимальному ускорению.

Таким образом, если носитель совершает колебания по закону  $\omega_n = A \sin(\omega t)$  ( $A$ ,  $\omega$  — амплитуда и круговая частота угловой скорости колебаний носителя соответственно), то из-за вязкого трения на платформу будет действовать гармонический возмущающий момент  $Ad \sin(\omega t)$ .

Что касается момента сил сухого трения, то при описании его функцией  $\text{sign}(\cdot)$  гармонические колебания носителя приведут к возмущающему моменту в форме прямоугольной волны (рис. 5, см. третью сторону обложки).

При разложении прямоугольной волны  $M_0 \text{sign}(\sin(\omega t))$  в ряд Фурье получим сумму гармоник с амплитудами и частотами, приведенными на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

Из рис. 6 следует, что действие сил сухого трения при колебаниях основания эквивалентно сумме гармоник с частотами, кратными частоте колебаний носителя с коэффициентами 3, 5, 7, ... . На рис. 6 приведена также единственная гармоника на частоте колебаний носителя  $\omega$ , вызванная моментом сил вязкого трения. Таким образом, если следовать опре-

делению синхронной погрешности [4], т. е. погрешности, изменяющейся синхронно с колебаниями носителя, то она вызывается моментом вязкого трения и первой гармоникой от момента сил сухого трения и пропорциональна величине  $Ad + \frac{4M_0}{\pi}$ .

На рис. 7 (см. третью сторону обложки) приведена спектральная характеристика макетного образца системы сопровождения с МЭМС-гироскопом, полученная при колебаниях стенда с частотой 2 Гц и амплитудой 200 %/с. На рис. 7 четко прослеживается гармоника на частоте колебаний стенда и кратные ей гармоники с коэффициентами 3, 5, 7, 9. Анализ данных гармоник позволяет оценить значения моментов сил вязкого и сухого трения, действующих в осях карданова подвеса, а следовательно, оценить относительную синхронную погрешность системы сопровождения  $\Delta\omega_{\text{синхр}}$ , которая определяется как отношение амплитуды угловой скорости платформы к угловой скорости носителя (стенда).

Теоретически относительную синхронную погрешность можно определить из передаточной функции (6):

$$\Delta\omega_{\text{синхр}} = \frac{\omega \left( d + \frac{4M_0}{\pi A} \right)}{\sqrt{(d + k_r k_p)^2 \omega^2 + (Q k_r k_p - J_0 \omega^2)^2}}. \quad (9)$$

Из данного соотношения следует, что для снижения синхронной погрешности необходимо уменьшать моменты сил сухого и вязкого трений, а также увеличивать добротность и произведение  $k_r k_p$ .

Для малых частот колебаний носителя, при  $\omega^2 \ll \frac{Q k_r k_p}{J_0}$  и выполнении условия

$$\omega \ll \frac{Q k_r k_p}{d + k_r k_p} \approx Q \quad (10)$$

относительная синхронная погрешность приближенно может быть найдена по формуле

$$\Delta\omega_{\text{синхр}} \approx \frac{\omega (\pi A d + 4 M_0)}{\pi A Q k_r k_p}. \quad (11)$$

Положим коэффициент вязкого трения  $d = 0,001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ , а модуль момента сил сухого трения  $M_0 = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , тогда для приведенных выше параметров системы сопровождения, на частоте колебаний основания 2 Гц с амплитудой 100 %/с, относительная синхронная погрешность составит  $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ . Следует отметить, что для диапазона частот (10) синхронная погрешность увеличивается с возраста-

нием частоты колебаний носителя. Соотношение (11) также показывает, что синхронная погрешность зависит не только от сил вязкого (скоростного) трения, как это отмечается в работе [4], но и определяется модулем момента сил сухого трения.

### Заклучение

Приведенные аналитические соотношения в рамках одноканального подхода позволяют прогнозировать характеристики проектируемой системы сопровождения. Показано, что ключевым параметром системы является добротность по скорости, от которой зависит установившееся значение угла рассогласования между осью следящей платформы и направлением на сопровождаемый объект. Кроме того, добротность в значительной степени определяет время переходного процесса и полосу пропускания системы сопровождения.

Получено соотношение для СКО угловой скорости платформы, вызванное шумом МЭМС-гироскопа. Установлено, что синхронные погрешности системы сопровождения определяются моментами сил как вязкого, так и сухого трения. Приведенная приближенная формула позволяет оценить синхронные погрешности разрабатываемой системы.

### Список литературы

1. Журавлев Л. Д., Фабрикант Е. А. Динамика систем сопровождения на подвижном основании. М.: Изд-во ЦНИИ "Румб", 1983. 90 с.
2. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 225 с.
3. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. II. Гироскопические стабилизаторы / Под ред. Д. С. Пельпора: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1977. 223 с.
4. Неусыпин А. К. Гироскопические приводы. М.: Машиностроение, 1978. 192 с.
5. Кринецкий Е. И. Системы самонаведения. М.: Машиностроение, 1970. 236 с.

## Tracking System of Moving Objects on MEMS-Gyroscopes

V. V. Matveev, matweew.valery@yandex.ru, E. Yu. Kislovsky, kislovskiy@bk.ru,  
D. N. Milchenko, dim2001@mail.ru, V. Ya. Raspopov, tgupu@yandex.ru, S. V. Telukhin, tgpu@yandex.ru,  
M. G. Pogorelov, mzhpogoreloff@yandex.ru, V. V. Likhosherst, lvv\_01@inbox.ru  
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education,  
Tula, 300012, Tula Branch, Russian Federation

Corresponding author: Matveev Valery V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education, Tula, 300012,  
Tula Branch, Russian Federation, e-mail: tgupu@yandex.ru, matweew.valery@yandex.ru

### Abstract

The tracking system of moving objects is analyzed on the basis of a biaxial cardan suspension with MEMS gyroscopes in the control loop. The kinematics of the tracking system in one of the guidance planes is considered. A block diagram of one channel of the tracking system, consisting of correction and stabilization circuits, is given. It is shown that the time of the transition process, the bandwidth, the phase delay between the angular velocity of the accompanied object and the platform is largely determined by the quality factor of the correction circuit speed. The given numerical estimates give an idea of the characteristics of the tracking system. Relations are given that make it possible to estimate the influence of the noise of a MEMS gyroscope on the angular velocity of a stabilized platform. The occurrence of synchronous errors of the tracking system on an oscillating carrier is explained. It is shown that the influence of dry friction forces in the axes of suspension on the tracking system is equivalent to the action of the sum of harmonics with frequencies multiple to the oscillation frequency of the carrier with odd coefficients. The effect of the moment of viscous friction forces in conditions of carrier oscillations is illustrated. An experimental spectral characteristic of the tracking system model on a swinging stand is presented, confirming the theoretical conclusions. An analytical relation is given to estimate the relative synchronous error of the tracking system.

**Keywords:** tracking system, MEMS gyroscope, gyro-stabilized platform, synchronous error

For citation:

Matveev V. V., Kislovsky E. Yu., Milchenko D. N., Raspopov V. Ya., Telukhin S. V., Pogorelov M. G., Likhosherst V. V. Tracking System of Moving Objects on MEMS-gyroscopes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 437–442.

DOI: 10.17587/mau.20.437-442

### References

1. Zhuravlev L. D., Fabricant E. A. Dynamics of tracking systems on a rolling basis, Central Research Institute "Rumb", 1983, 90 p. (in Russian).

2. Matveev V. V., Raspopov V. Ya. Instruments and systems for orientation, stabilization and navigation on MEMS sensors, Tula, Publishing House of TSU, 2017, 225 p. (in Russian).

3. Pelpore D. S. Gyroscopic systems. Designing gyroscopic systems. Part II. Gyroscopic stabilizers. Training Allowance for universities, Moscow, Vysshaya shkola, 1977, 223 p. (in Russian).

4. Neusypin A. K. Gyroscopic drives, Moscow, Mashinostroenie, 1978, 192 p. (in Russian).

5. Krinetsky E. I. Systems homing, Moscow, Mashinostroenie, 1970, 236 p. (in Russian).