

И.Е. Шустов, А.А. Волынцев, Б.А. Казаков

**ДИНАМИКА ДВУХКОНТУРНОГО  
ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ  
ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ**

*Рассмотрен принцип построения двухконтурной системы обратной связи измерительного канала прецизионного гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС) на базе поплавковых гироскопов. Изложен алгоритм работы измерительного канала (ИУ). Приведены аналитические выражения математической модели ИК с двухконтурной системой обратной связи. Описан механизм появления динамической ошибки измерительной системы, возникающей при взаимодействии контуров.*

**E-mail: info@niipm.ru**

**Ключевые слова:** поплавковый гироскоп, двухконтурная система, измерительный канал, динамическая ошибка.

**Введение.** Гироскопические измерители вектора угловой скорости (ГИВУС) применяют в системах управления ориентацией и стабилизацией космических аппаратов (КА). ГИВУС представляет собой прибор бесплатформенного типа, состоящий, как правило, из нескольких (не менее трех) независимых измерительных каналов (ИК), число которых определяется необходимой надежностью и точностью работы прибора\*.

В отечественной космонавтике приборы типа ГИВУС используются с середины 1980-х годов. Первые приборы были разработаны в НИИ Прикладной механики (Москва) и успешно работали на станции «Мир» и всех ее модулях. В настоящее время точность лучших образцов ГИВУС составляет примерно 0,003 град/ч ( $3\sigma$ ) в диапазоне значений измеряемых угловых скоростей  $\pm 0,5$  град/с, что вполне достаточно для большинства задач, решаемых КА на геостационарных орбитах (связь, мониторинг). Высокая точность обеспечивается применением в качестве чувствительных элементов ИК поплавковых двухстепенных гироскопов с газодинамической опорой ротора и магнитным центрированием поплавка. Для других орбит и целевых задач КА используются приборы типа ГИВУС менее точные (0,05...0,5 град/ч), но с диапазоном значений измеряемых скоростей до десятков градусов в секунду.

Однако в последнее время возникла потребность обеспечить прецизионную точность измерений примерно 0,001 град/ч ( $3\sigma$ ) в диапа-

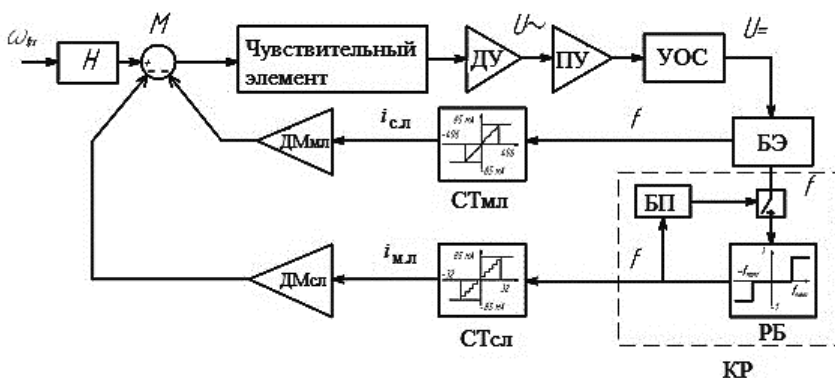
---

\* Повышение точности и диапазона измерения прецизионных гироскопических измерителей вектора угловой скорости на базе поплавковых чувствительных элементов / А.А. Волынцев, В.В. Воробушкин, Б.А. Казаков, Н.А. Тидеман и др. // XVI Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам: Сб. трудов. — СПб., 2009. — С. 114—123.

зоне значений угловых скоростей  $\pm(1...2)$  град/с. Это необходимо для систем ориентации перспективных российских научных КА (например, КА серии «Спектр», разрабатываемые в НПО им. С.А. Лавочкина) и спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Кроме точности, одним из основных требований является обеспечение ресурса работы более 100 000 ч. За решение задачи создания ГИВУС с такими характеристиками взялся НИИ ПМ, имеющий самый большой в России опыт разработки и изготовления таких приборов.

В качестве прототипа нового измерителя НИИ ПМ был выбран собственный прибор на базе поплавковых гиросблоков (также разработки НИИ ПМ), эксплуатировавшийся на более чем 20 КА с подтвержденным ресурсом работы свыше 10 лет. Для обеспечения прецизионной точности в расширенном диапазоне измерений угловых скоростей были успешно решены две основных задачи: модернизация конструкции гиросблока (усиление датчика момента) и применение специально созданной двухконтурной системы обратной связи ИК. Идея двухконтурной системы заключается в том, что в систему обратной связи гироскопа дополнительно введен второй контур, который должен обеспечить ступенчатую компенсацию гироскопического момента при входной угловой скорости, превышающей линейный диапазон основного ИК. Это значительно улучшило выходные параметры измерительной системы за счет расширения диапазона измерений с сохранением точности «малого» диапазона.

**Схема и алгоритм работы двухконтурной системы обратной связи.** Рассмотрим функциональную схему двухконтурной системы обратной связи, реализованной в приборе разработки НИИ ПМ (рис. 1).



**Рис. 1. Функциональная схема двухконтурной системы обратной связи:**

$\omega_{вх}$  — входная угловая скорость;  $H$  — кинетический момент гироскопа;  $M$  — момент, действующий на гироскоп;  $U_{\sim}$ ,  $U_{=}$  — сигналы переменного и постоянного тока;  $f$  — сигнал частоты;  $i_{мл}$ ,  $i_{сл}$  — управляющий ток младшей и старшей линеек; ДУ — датчик угла гироскопа; ПУ — предварительный усилитель; УОС — усилитель обратной связи; БЭ — блок электроники; БП — блок прерывания; РБ — релейный блок; КР — контроллер; СТмл, СТсл — стабилизаторы тока младшей и старшей линеек; ДМмл, ДМсл — датчики момента младшей и старшей линеек

Обратная связь построена по принципу двухотсчетной измерительной системы и включает в себя два контура (две линейки) — контур младшей линейки (гироскоп — датчик угла гироскопа младшей линейки (ДУ) — предварительный усилитель (ПУ) — усилитель обратной связи (УОС) — блок электроники (БЭ) — стабилизатор тока младшей линейки (СТмл) — датчик момента младшей линейки (ДМмл)), работающий в диапазоне угловых скоростей до 0,1 град/с, и контур старшей линейки (гироскоп — датчик угла гироскопа старшей линейки (ДУ) — ПУ — УОС — БЭ — контроллер (КР) — стабилизатор тока старшей линейки (СТсл) — датчик момента старшей линейки (ДМсл)), функционирующий в диапазоне угловых скоростей до 2 град/с.

Главенствующую роль при измерении выполняет контур младшей линейки. Он включается в работу сразу же с момента подачи питания на ИК.

Контур младшей линейки образует систему автоматического регулирования, предназначенную для уравнивания момента разгрузки ДМ с гироскопическим моментом по оси прецессии гироскопа в узком диапазоне значений входной угловой скорости. Вследствие высокой чувствительности с наивысшей точностью выделяется полезная информация о текущем значении измеряемой входной угловой скорости.

Амплитудно-модулированный сигнал с ДУ проходит усиление на ПУ, частотную коррекцию и фазочувствительное выпрямление на УОС и широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) на БЭ. ШИМ-сигнал с БЭ подается на СТмл, где преобразуется в парафазный ШИМ-ток и подается на ДМмл.

В узком диапазоне значений контур старшей линейки исключен из работы системы обратной связи, чтобы своим «нулевым сигналом» не влиять на точность и чувствительность контура младшей линейки.

При выходе из диапазона, одному только контуру младшей линейки уже не хватит разгрузочной способности, тогда гироскоп теряет устойчивость (опрокинется на свой упор).

Для предотвращения подобных ситуаций в постоянном дежурном режиме находится контроллер. Оцифрованная информация о наполнении полупериодов биполярного ШИМ-сигнала по контуру младшей линейки в виде двоичного кода подается на КР для анализа и принятия решения о необходимости подключения контура старшей линейки. Подключение контура происходит, как только текущее значение с контура младшей линейки превысит установленное пороговое значение (это примерно 70 % от предела линейной зоны, т. е. 0,07 град/с). Чтобы контур старшей линейки постоянно находился в «нулевой» готовности, он постоянно включен и предварительно нагружен на балластную нагрузку, эквивалентную реальной нагрузке. При своем включении в цепь регулирования контур старшей линейки исполняет роль основного компенсирующего канала. Блок электроники по команде с КР начинает генерировать ШИМ-сигнал, поступающий на СТсл, в соответствии с которым на ДМсл коммутируется парафазный ШИМ-ток.

В результате состоявшейся компенсации разгрузочного момента текущий рабочий сигнал в контуре младшей линейки обнуляется, и с этого момента контур готов к измерению входной скорости вновь в полном своем диапазоне. В это время контур старшей линейки продолжает формировать компенсационный сигнал, находясь на первой ступени компенсации. При очередном достижении значения с контура младшей линейки порогового значения процесс переключения контура старшей линейки повторится в ту или в другую сторону, в зависимости от знака входной угловой скорости (рис. 2).

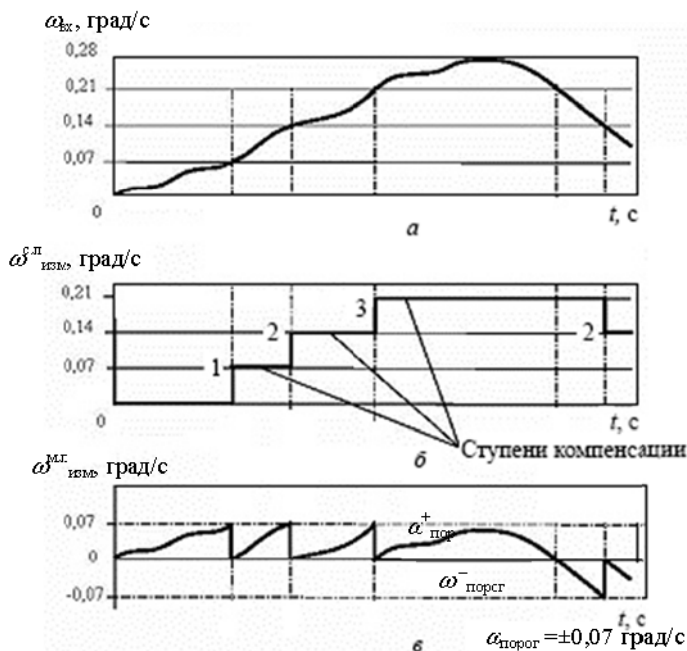


Рис. 2. Временные диаграммы работы двухконтурной системы для входной угловой скорости (а), измеренной угловой скорости с контуров старшей (б) и младшей (в) линеек

**Передаточная функция двухконтурной системы обратной связи.** Вид передаточной функции такой системы в основном определяется передаточной функцией контура младшей линейки (гироскопа и УОС). Динамическая модель контура младшей линейки в операторной формуле

$$F_{м.л.}(p) = K_{\omega}^{м.л.} \left[ \frac{(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)} \right] [\omega_{вх}(p) - \omega_{с.л.}^{комп}(p)];$$

$$T_1 T_3 = \frac{T_1^*}{K_c}; \quad (T_1 + T_3) = \left( T_2^* + \frac{1}{K_c} \right); \quad T_2 = T_2^*,$$

где  $F_{м.л}(p)$  — изображение выходного сигнала контура младшей линейки в виде частоты, пропорциональной входной угловой скорости;  $K_{\omega}^{м.л}$  — коэффициент передачи контура младшей линейки (крутизна);  $T_1^*, T_2^*$  — постоянные времени двух апериодических звеньев частотно-корректирующего контура в системе обратной связи;  $\omega_{вх}(p)$  — оператор входной угловой скорости;  $\omega_{с.л}^{комп}(p)$  — оператор компенсирующей скорости, вырабатываемой контуром старшей линейки;  $K_c$  — коэффициент передачи разомкнутой системы обратной связи.

Информация, которую обрабатывает КР для управления контуром старшей линейки без учета шума и методических погрешностей системы, вычисляется по формуле

$$n_{м.л}(i) = \text{Ent} \left\{ \int_{\tau_{i-1}^{м.л}}^{\tau_i^{м.л}} F_{м.л}(t) dt + \Delta n(i-1) \right\}_i,$$

где  $n_{м.л}(i)$  — измеренное число дискретов информации за  $i$ -й период ШИМ работы контура младшей линейки;  $\Delta n(i-1)$  — остаток от выделения целого числа  $i-1$  в конце предыдущего периода ШИМ;  $\text{Ent}\{\cdot\}$  — целая часть функции  $F(\cdot)$ ;  $\tau_i^{м.л}, \tau_{i-1}^{м.л}$  — сетка времени работы ШИМ контура младшей линейки,  $i$  — индекс периода.

Как уже было отмечено, контур старшей линейки обеспечивает работу контура младшей линейки в пределах своего (узкого) диапазона измерения. Передаточная функция этого контура

$$F_{с.л}(p) = K_{\omega}^{с.л} \omega_{вх}(p),$$

причем

$$\omega_{с.л}^{комп}(p) = \sum_k \frac{F_{с.л}(p)}{K_{\omega}^{с.л}} = \frac{N_{с.л}(k)}{K_{\omega}^{с.л}};$$

$$N_{с.л}(k) = \sum_j (N_{с.л}(j) + \Delta N_j^{с.л}(n_{м.л}(i-1))),$$

где  $F_{с.л}(p)$  — изображение выходной информации контура старшей линейки в виде частоты, пропорциональной входной угловой скорости;  $K_{\omega}^{с.л}$  — коэффициент передачи контура старшей линейки (крутизна);  $N_{с.л}(k)$  — число импульсов унитарного кода за  $k$ -й такт опроса информации с контура старшей линейки;  $N_{с.л}(j)$  — подсчитанное число дискретов информации за  $j$ -й период работы ШИМ контура старшей линейки;  $\Delta N_j^{с.л}(n_{м.л}(i-1))$  — приращение числа импульсов

контура старшей линейки за  $j$ -й такт работы  $F_{ШИМ}^{с.л}$ , зависящее от числа импульсов контура младшей линейки, полученного за предыдущий  $i-1$  такт работы  $F_{ШИМ}^{м.л}$ ;  $j$  — индекс периода работы ШИМ контура старшей линейки. Максимальное число  $j$  зависит от периода опроса ИК:  $j^{\max} = T_{\text{опр}} F_{ШИМ}^{с.л}$ ,  $F_{ШИМ}^{с.л} = 2F_{ШИМ}^{м.л} = 250$  Гц.

При этом

$$\Delta N_j^{с.л}(n_{м.л}(i-1)) = \begin{cases} -1 & \text{при } n_{м.л}(i-1) \leq -n_{м.л}^{\text{порог}}; \\ +1 & \text{при } n_{м.л}(i-1) \geq n_{м.л}^{\text{порог}}; \\ 0 & \text{при } (-n_{м.л}^{\text{порог}} < n_{м.л}(i-1) < n_{м.л}^{\text{порог}}) \vee \tau < 200 \text{ мс,} \end{cases}$$

где  $\tau$  — время задержки, отсчитываемое от последнего переключения контура старшей линейки (25 тактов контура младшей линейки), необходимое для предотвращения «дребезга».

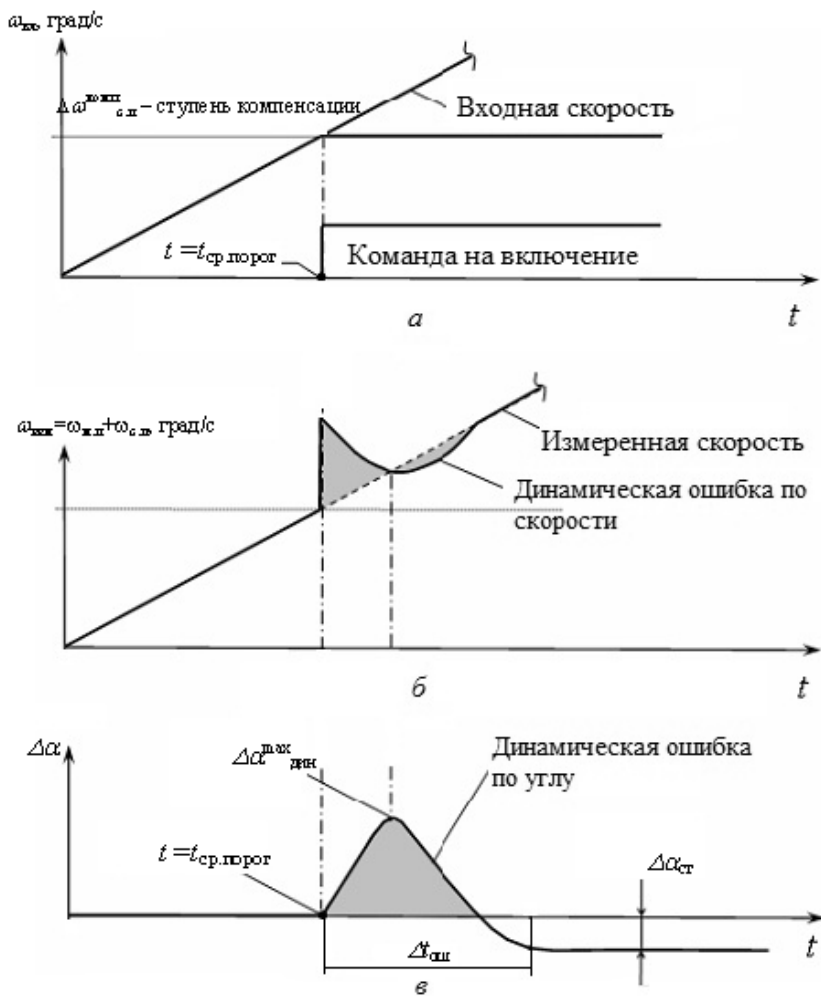
**Динамическая ошибка системы.** Момент компенсации контура старшей линейки прикладывается ступенчато, что вызывает дополнительную ошибку в контуре младшей линейки, которая называется динамической. Динамическая ошибка зависит от динамических характеристик контура младшей линейки.

Динамическая ошибка будет возникать в системе каждый раз при срабатывании очередной ступени компенсации. Физика проявления этой ошибки связана с инерционностью контура младшей линейки системы. Набрав в процессе измерения текущее значение показания, равное пороговому значению, контур младшей линейки вследствие своей инерционности не может мгновенно сбросить показание в «ноль». В итоге процедура обнуления показания контура младшей линейки проявится в виде переходного процесса. Динамическая ошибка (рис. 3) может быть найдена по следующим формулам:

$$\Delta \omega_{\text{дин}}(p) = \Delta \omega_{с.л}^{\text{комп}} \left[ 1 - \frac{T_2 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)} \right] \text{ — для скорости;}$$

$$\Delta \alpha_{\text{дин}}(t \geq t_{\text{ср. порог}}) = \int_{t_{\text{ср}}}^t \Delta \omega_{\text{дин}} dt - \Delta \alpha_{\text{ст}} \text{ — для угла,}$$

где  $\Delta \omega_{с.л}^{\text{комп}}$  — величина одной ступени компенсации по угловой скорости;  $\Delta \alpha_{\text{ст}} = \frac{\Delta \omega_{с.л}^{\text{комп}}}{2K_c}$  — статическая ошибка.



**Рис. 3. Временные диаграммы информации контура младшей линейки**

**Заключение.** Введение в измерительную систему второго контура обратной связи позволяет значительно улучшить характеристики ИК прибора типа ГИВУС (повысить диапазон измерений с сохранением прецизионной точности) и может быть реализовано без значительного усложнения электроники, входящей в состав ИК. Однако это вызывает появление дополнительной ошибки, которую необходимо учитывать алгоритмически.

Статья поступила в редакцию 4.07.2012