

T. L. Kachanova, B. F. Fomin  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## INTRASYSTEM INTERACTIONS ON THE BASIS OF «SIMILARITY» MODEL (ACTUALIZATION)

*The first part of the paper is dedicated to theoretical questions of intrasystem interactions between system's eigen qualities and contains investigations of structural invariants of two-particle interactions on the basis of «similarity» model (interactions on «similarity») that arise under conditions of non-equilibrium constraints and metastability. Statements and conclusions of theory of interactions on «similarity» and «pseudo-similarity» are actualized in the second part of the paper. All theoretically established types of interactions of eigen system qualities, that disclose sense identity of mechanisms of these qualities, are revealed and empirically confirmed on real data gathered under a project named «Social tension in districts and regions of Russia». The interactions on «similarity» (with the kinds: synchrony, in-phase synchrony, asynchrony and likeness of particular aspects of interaction) are actualized and rationally explained. All scientifically established (in the first part of this paper) interactions on «pseudo-similarity» that manifest moments of difference in a system, are verified within the same project. Possible options for integrating a model of «pseudo-similarity» into a model of third participant (eigen quality) of the interaction are actualized too. In doing so, arising local system feedback mechanisms affecting order center of third participant became empirically confirmed scientific fact.*

**Open systems, Physics of open systems, eigen qualities of systems, models of two-particle interactions, interaction on «similarity» model, interaction on «pseudo-similarity» model**

УДК 681.532.5 + 681.58

Д. С. Положенцев, К. А. Смирнов  
АО «НИИ командных приборов»

## Система управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса

*Представлено описание системы управления исполнительного электропривода (ИЭП) силового гироскопического комплекса (СГК), который является исполнительным органом системы ориентации космического аппарата. Дано краткое описание состава СГК, принципа и основных режимов его работы. Приведена структурная схема и описан принцип работы системы управления ИЭП СГК, реализующей управление угловой скоростью вращения в режиме обратной связи по угловому положению. Также приведено описание основных составных частей ИЭП СГК – интегратора угловой скорости, регулирующих устройств, исполнительного двигателя, силового гироскопа и измерителя углового положения (ИУП). Приведен алгоритм программной компенсации гармонических составляющих погрешности ИУП, применяемых в составе ИЭП СГК, и представлены результаты его применения, полученные на реальном образце. Представлены разработанная в среде Matlab/Simulink математическая модель ИЭП СГК и результаты моделирования.*

**Силовой гироскопический комплекс, исполнительный электропривод, обратная связь по угловому положению, система управления угловой скоростью, регулирующее устройство, тарировка, измеритель углового положения, математическая модель**

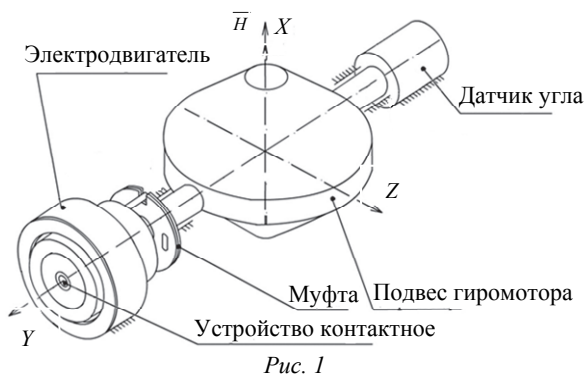
Силовой гироскопический комплекс (СГК) – это инерциальное устройство, применяемое, как правило, в качестве исполнительного органа (ИО) в системах ориентации (СО) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли, обеспечивающее правильную ориентацию КА в полете и предотвращающее его беспорядочное вращение [1]–[3].

Как правило, СГК состоит из силового гироскопического прибора (СГП) – силового гироскопа в кардановом подвесе с двумя степенями свободы (гиродина) и электронного прибора (ЭП) – устройства, обеспечивающего отработку заданных СО КА команд управления и передачу телеметрической информации. Общая схема механической части СГП, показывающая расположение

его основных элементов и обозначения осей, представлена на рис. 1, где  $\vec{H}$  – кинетический момент ротора силового гироскопа,  $XYZ$  – система координат, связанная с основанием СГП.

Управляющий момент СГК определяется как векторное произведение кинетического момента ротора гиromотора на угловую скорость поворота его подвеса [4], [5].

Стабильность модуля кинетического момента ротора может быть обеспечена с точностью до десятых долей процента, поэтому точность реализации управляющего момента СГК определяется работой исполнительного электропривода (ИЭП), объектом управления которого является подвес гиromотора (ПГ) [6], [7].



Основными режимами работы СГК являются так называемые режимы стабилизации и программных поворотов. Режим стабилизации характеризуется низкими задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ, которые могут быть на уровне тысячных долей градуса в секунду, и высокими требованиями к точности их отработки. Режим программных поворотов характеризуется задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ на уровне десятков градусов в секунду и высоким значением возмущающего гироскопического момента, действующего по оси ПГ [8].

**Структурная схема.** Высокие требования по ограничению габаритно-массовых характеристик бортовых приводов, стойкости к факторам космического пространства, длительный срок активного существования КА существенно влияют на структуру и состав электропривода. Современный бортовой ИЭП строится на основе вентильного двигателя (ВД) и работает в режиме обратной связи по угловому положению ПГ. На валу ПГ располагается датчик угла (ДУ), на базе которого строится измеритель углового положения (ИУП), сообщаящий информацию о направлении вектора кинетического момента СГК в СО КА [9].

Обычно этот же ИУП используется для организации обратной связи по угловому положению и для управления вентильным двигателем. Структурная схема системы управления ИЭП СГК представлена на рис. 2, где И – интегратор задаваемой угловой скорости вращения ПГ; УС1–УС3 – устройства сравнения; РУ – регулятор контура угла; РТ  $I_q$  и РТ  $I_d$  – регуляторы проекций вектора тока в системе координат, «скрепленной» с ротором ВД; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; ИП – источник питания; КУМ – ключевой усилитель мощности; БВП – блок вычисления проекций; БПК – блок преобразования координат; ИД – исполнительный двигатель; СГ – силовой гироскоп; ИУП – измеритель углового положения; МК – микроконтроллер; БУП – блок управления приводом; СГП – силовой гироскопический прибор;  $N_{зад}$  – код задаваемой угловой скорости вращения ПГ;  $N_{\alpha зад}$  – код задающего углового положения ПГ;  $\Delta N_{вх1}$  – сигнал рассогласования контура угла;  $\Delta N_{вх2}$  – сигнал рассогласования контура тока по оси  $q$ ;  $\Delta N_{вх3}$  – сигнал рассогласования контура тока по оси  $d$ ;  $U_q, U_d$  – расчетные проекции вектора напряжения;  $T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}$  – сигналы ШИМ, управляющие коммутатором;  $U_{1ф}, U_{2ф}, U_{3ф}$  – реальные значения напряжений в фазах;  $I_{1ф}, I_{2ф}$  – измеряемые значения токов в фазах;  $I_x, I_y$  – коды проекций вектора тока в неподвижной системе координат;  $I_q, I_d$  – коды проекций вектора тока в системе координат, «скрепленной» с ротором ВД;  $\alpha_{дв}$  – угловое положение ротора ВД;  $\varphi_n$  – угловое положение ПГ;  $N_{\varphi СГ}$  – код углового положения ПГ.

Принцип работы ИЭП основан на сравнении кодов текущего угла, получаемого от ИУП, с опорным, вычисленным в МК интегрированием кода задаваемой угловой скорости вращения ПГ, поступающего из СО КА, и выдаче управляющих сигналов, соответствующих скорректированной разнице этих кодов, на исполнительный двигатель.

**Интегратор угловой скорости** необходим для формирования задающего кода углового положения ПГ и описывается следующим образом:

$$W_{и}(s) = \frac{K_{и}}{s},$$

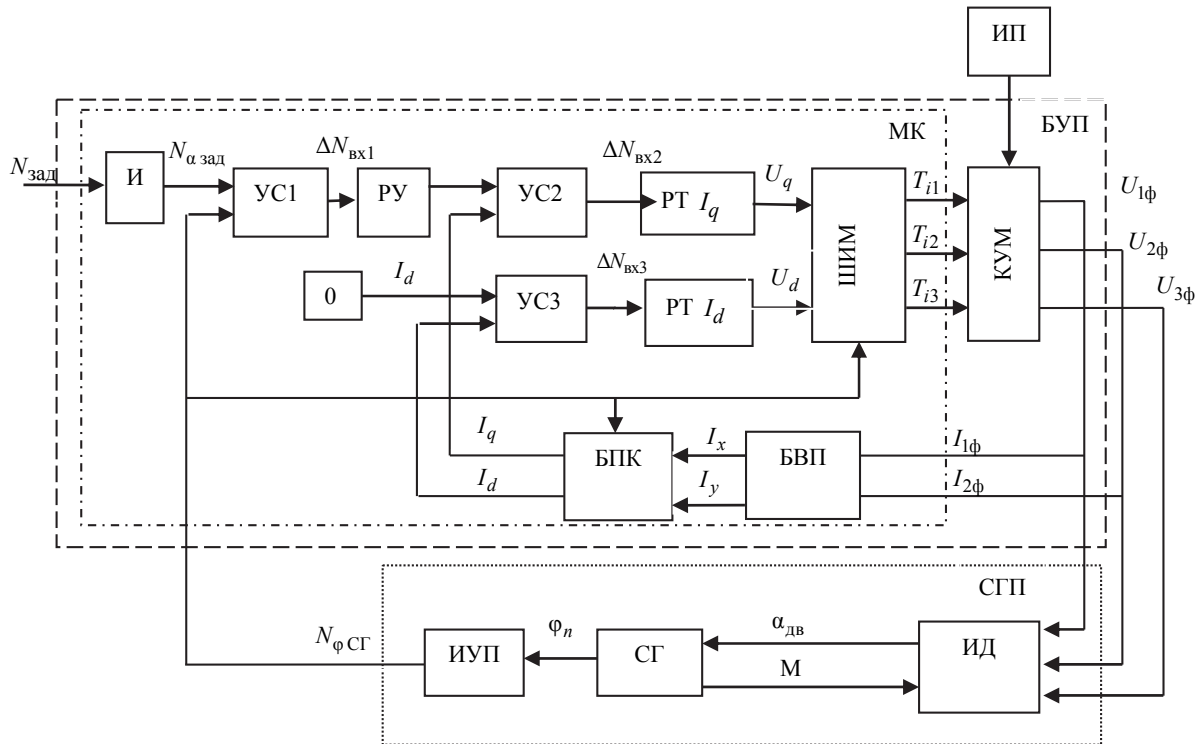


Рис. 2

где  $K_{и}$  – коэффициент интегрирования, предназначенный для согласования разрядных сеток задающего и измеренного значений углового положения ПГ;  $s$  – оператор Лапласа.

Коэффициент интегрирования вычисляется следующим образом:

$$K_{и} = \frac{K_{\omega}}{\delta},$$

где  $K_{\omega}$  – крутизна характеристики «код–скорость»;  $\delta$  – дискретность преобразования «угол–код» ИУП [10], [11].

**Регулирующие устройства.** Из всех способов построения мехатронных систем преимущественное распространение получили системы с подчиненным регулированием. В них объект регулирования по возможности разбивается на ряд динамических звеньев с передаточной функцией  $W_{об}(s)$ , для каждого из которых синтезируется свой регулятор. На вход  $k$ -го регулятора с передаточной функцией  $W_p(s)$  подается сигнал с предыдущего регулятора, соответствующий задаваемому уровню регулируемой величины, и сигнал с выхода  $k$ -го звена системы, отвечающий фактическому уровню. Для формирования сигнала обратной связи в каждой из подсистем автоматического регулирования предусматривается датчик  $W_{о.с}(s)$ , соответствующий регулируемой величине. Таким

образом, для каждой из регулируемых величин предусматривается замкнутая система автоматического управления (САУ) с регулированием по отклонению. Каждая САУ снабжена индивидуальным регулятором. Количество регуляторов в системе подчиненного регулирования равно количеству выделенных звеньев объекта. На каждом этапе синтеза регулирующих устройств проектировщик имеет дело со структурой, представленной на рис. 3.

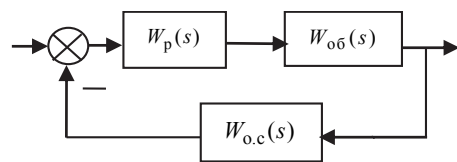


Рис. 3

В этой структуре необходимо выбрать тип регулятора и рассчитать его параметры, при которых замкнутая система удовлетворяет определенным динамическим требованиям.

Регуляторы соединяются между собой последовательно, но в обратном порядке по отношению к порядку связи звеньев объекта. Каждый последующий регулятор вырабатывает задание для предыдущего регулятора [12]–[14].

Зачастую, для обеспечения заданных динамических и точностных требований, в качестве регулирующего устройства достаточно использовать ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном вида:

$$W_p(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + \frac{k_{\text{Д}}s}{T_{\text{Д}}s + 1},$$

где  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{Д}}$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты регулятора;  $T_{\text{Д}}$  – постоянная времени дифференциального звена.

В том случае, когда «классического» ПИД-регулятора не достаточно для реализации САУ с заданными техническим параметрами, в качестве регулирующего устройства может служить ПИД-регулятор с супервизором [15], адаптивный сетевой ПИД-регулятор [16] или ПИД-регулятор с нечеткой логикой [17].

**Исполнительный двигатель** в электроприводе является главным исполнительным элементом. От того, насколько быстро двигатель развивает обороты, преодолевая сопротивление нагрузки, зависит быстродействие электропривода. От способности двигателя развивать момент на валу при малых сигналах управления зависит плавность работы электропривода и его точность.

Силовая часть двигателя представляет собой трехфазную синхронную электрическую машину с возбуждением от постоянных магнитов. Датчик положения ротора отсутствует, для расчета коммутационной функции управления ключевым усилителем мощности (КУМ) и формирования требуемых напряжений на фазах двигателя используется сигнал с ИУП, приведенный к электрическому угловому положению ротора двигателя.

Для упрощения математического описания ВД используется система координат  $q-d$ , жестко связанная с ротором, при этом ось  $d$  совмещается с направлением магнитного поля ротора. В этом случае операторные уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе, имеют вид [18]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = R(T_d s + 1)i_d - \omega L_q i_q, \\ U_q = R(T_q s + 1)i_q + \omega L_d i_d + \psi_0 \omega, \\ M = p \frac{m}{2} (\psi_0 i_0 + (L_d - L_q) i_d i_q), \\ s \omega_m = \frac{1}{J} (M - M_H), \\ s \theta_m = \omega_m, \\ \omega = p \omega_m, \end{array} \right.$$

где  $U_d$ ,  $U_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  – проекции напряжения и тока статора на оси  $d$  и  $q$ ;  $\psi_0$  – проекция потокоцепления ротора на ось  $d$ ;  $T_d$ ,  $T_q$ ,  $L_d$ ,  $L_q$  – постоянные

времени и индуктивности обмоток статора по продольной и поперечным осям;  $R$  – эквивалентное сопротивление статорной обмотки;  $\omega_m$ ,  $M$ ,  $M_H$ ,  $\theta_m$  – механическая угловая скорость вращения, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала;  $J$  – момент инерции ротора;  $m$  – число фаз;  $\omega$ ,  $p$  – электрическая угловая скорость и число пар полюсов.

Так как электромагнитный момент двигателя прямо пропорционален поперечной составляющей вектора тока ( $i_q$ ) и не зависит от продольной составляющей ( $i_d$ ), необходимо регулировать  $U_d$  (тем самым и  $i_d$ ) в ноль, уменьшая таким образом потребляемую мощность двигателя.

**Силовой гироскоп.** «Классическая» система уравнений, описывающая двухстепенной гироскоп, имеет следующий вид [19]:

$$\begin{cases} J_{\alpha} \ddot{\alpha} + h_{\alpha} \dot{\alpha} - H \dot{\beta} = 0, \\ J_{\beta} \ddot{\beta} + h_{\beta} \dot{\beta} - H \dot{\alpha} - M_{\text{упр}} = 0, \end{cases}$$

где  $J_{\alpha}$ ,  $J_{\beta}$  – моменты инерции относительно осей  $Z$  и  $Y$  соответственно;  $h_{\alpha}$ ,  $h_{\beta}$  – коэффициенты вязкого трения при вращении относительно осей  $Z$  и  $Y$  соответственно;  $\dot{\alpha} = \omega_{\text{КА}}$ ,  $\ddot{\alpha} = \varepsilon_{\text{КА}}$ ,  $\dot{\beta}$ ,  $\ddot{\beta}$  – угловые скорости и ускорения вращения относительно осей  $Z$  и  $Y$  соответственно;  $\omega_{\text{КА}}$ ,  $\varepsilon_{\text{КА}}$  – угловая скорость и ускорение КА;  $H$  – кинетический момент, создаваемый гиromотором;  $M_{\text{упр}}$  – момент упругости.

После некоторых уточнений система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} J_{\alpha} \varepsilon_{\text{КА}} + h_{\alpha} \omega_{\text{КА}} - H \dot{\beta} = 0, \\ \left( J_{\text{ПГ}} + \frac{H^2}{K_{\text{ЭКВ}}} \right) \ddot{\beta} + h_{\beta} \dot{\beta} - H \dot{\alpha} - (\alpha_{\text{дв}} - \beta) C_{\text{угл}} = 0, \end{cases}$$

где  $J_{\text{ПГ}}$  – механический момент инерции ПГ по оси  $Y$ ;  $\frac{H^2}{K_{\text{ЭКВ}}}$  – «кажущийся» момент инерции [20], где  $K_{\text{ЭКВ}}$  – суммарная угловая жесткость вала ротора, диафрагмы, подшипников, рамки гиromотора и подшипников ПГ;  $C_{\text{угл}}$  – коэффициент угловой жесткости ПГ по оси  $Y$ ;  $\alpha_{\text{дв}}$  – угловое положение ротора двигателя;  $M_{\text{возм}}$  – возмущающий момент, создаваемый вследствие вращения КА вокруг оси  $Z$ .

**Измеритель углового положения.** Точность обработки задаваемой угловой скорости вращения во многом определяется качеством сигнала с датчика, используемого в контуре обратной связи. ИУП состоит из датчика угла типа индукционный редуктосин (ИР) и преобразователя электронного (ПЭ) – устройства, преобразующего выходные сигналы датчика угла в двоичный код.

Датчики угла типа ИР находят широкое применение в навигационных системах и системах управления, особенно если эти системы используются в жестких условиях эксплуатации. В настоящее время в составе современных ИЭП СГК используются ИР с двумя отсчетами – грубым (с единичным коэффициентом редукции) и точным (коэффициент редукции обычно составляет 128).

Погрешность ИУП зависит от многих параметров ИР и ПЭ, таких, как несинусоидальность коэффициента взаимной индукции, неравенство активных и индуктивных сопротивлений вторичных обмоток, неперпендикулярность вторичных обмоток, несинусоидальность напряжения питания, присутствие напряжения смещения (нулевого напряжения), присутствие емкостной связи между вторичными обмотками, и многих др. Погрешности ИР возникают вследствие несовершенства технологической оснастки, приспособлений, необходимости наличия технологических зазоров для сборки пакетов, из-за заусенцев, эллиптичности пластин, а также из-за неизбежных операций по шлифовке и притирке внешней и внутренней поверхностей пакета статора [21]. Погрешности, вносимые ПЭ, определяются, в основном, применяемой в нем электронно-компонентной базой.

Определение математических моделей отдельных составляющих погрешности – весьма трудоемкая задача. Однако известно, что в спектре погрешности ИР доминируют гармоники с номерами, пропорциональными коэффициенту электрической редукции [22]. Погрешности различных экземпляров датчиков одинаковой конструкции имеют одинаковый набор гармонических составляющих, от образца к образцу изменяются только амплитуды и фазы гармоник. Общую модель погрешности можно описать следующим образом:

$$\Delta\alpha = \sum_{i=0}^m X_i \sin(i\alpha + \xi_i) + \sum_{j=0}^m Y_j \sin(jp\alpha + \Psi_j),$$

где  $\alpha$  – угловое положение ИР;  $p$  – коэффициент редукции точного отсчета (ТО);  $X_i, Y_i$  – амплитуды гармонических составляющих грубого (ГО) и

ТО;  $\xi_i, \Psi_j$  – начальные фазы гармонических составляющих ГО и ТО.

Средства микропроцессорной техники позволяют повысить точность измерения угла за счет применения программных методов компенсации (тарировки) гармонических составляющих погрешности ИУП.

Для тарировки ИУП должен использоваться высокоточный многозарядный датчик углового положения (который может быть принят за эталонный), вал которого соосно закрепляется с ротором ИР. Сам процесс тарировки можно разделить на 2 этапа. На первом этапе компенсируется смещение выходных напряжений ГО и ТО, которое вносит наибольший вклад в погрешность ИУП, и проводится нормирование их амплитуд. Компенсация гармонических составляющих погрешности производится на втором этапе.

Перед проведением первого этапа тарировки необходимо снять массивы мгновенных значений напряжений синусоидальной и косинусоидальной обмоток каждого из отсчетов. Полученная информация обрабатывается по следующей методике:

1. Определяется постоянная составляющая (смещение) напряжений синуса и косинуса:

$$U_{0\sin} = \sum_{i=0}^n U_{j\sin} / n, \quad U_{0\cos} = \sum_{i=0}^n U_{i\cos} / n,$$

где  $U_{0\sin}, U_{0\cos}$  – смещение напряжений синуса и косинуса;  $U_{i\sin}, U_{i\cos}$  – значение  $i$ -го измерения напряжений синуса и косинуса;  $n$  – количество опросов на один оборот ротора ИР.

2. Проводится компенсация смещения напряжений синуса и косинуса:

$$U_{ik\sin} = U_{i\sin} - U_{0\sin}, \quad U_{ik\cos} = U_{i\cos} - U_{0\cos},$$

где  $U_{ik\sin}, U_{ik\cos}$  – скомпенсированные  $i$ -е значения напряжения синуса и косинуса.

3. Определяется амплитуда напряжений синуса и косинуса:

$$A_{\sin} = \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^n U_{ik\sin} \cos\left(\frac{2\pi i}{n}\right),$$

$$B_{\sin} = \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^n U_{ik\sin} \sin\left(\frac{2\pi i}{n}\right),$$

$$M_{\sin} = \sqrt{A_{\sin}^2 + B_{\sin}^2},$$

$$A_{\cos} = \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^n U_{ik\cos} \cos\left(\frac{2\pi i}{n}\right),$$

$$B_{\cos} = \frac{2}{n+1} \sum_{i=0}^n U_{ik_{\cos}} \sin\left(\frac{2\pi i}{n}\right),$$

$$M_{\cos} = \sqrt{A_{\cos}^2 + B_{\cos}^2},$$

где  $A_{\sin}$ ,  $B_{\sin}$ ,  $A_{\cos}$ ,  $B_{\cos}$  – амплитуды гармонических составляющих напряжений синуса и косинуса, полученные с помощью быстрого преобразования Фурье [23];  $i$  – номер опроса.

4. Проводится нормирование напряжений синуса и косинуса:

$$U_{iH_{\sin}} = \frac{U_{ik_{\sin}}}{M_{\sin}}, \quad U_{iH_{\cos}} = \frac{U_{ik_{\cos}}}{M_{\cos}},$$

где  $U_{ik_{\sin}}$ ,  $U_{ik_{\cos}}$  – нормированные  $i$ -е значения напряжений синуса и косинуса.

5. На этом заканчивается первый этап тарировки. Перед проведением компенсации гармонических составляющих погрешности необходимо снять показания эталонного датчика и нормированного ИУП, найти их разность и произвести гармонический анализ погрешности измерителя. Исходя из результатов Фурье-анализа, можно определить номера гармонических составляющих, оказывающих наибольшее влияние на погрешности ИУП и, следовательно, требующих компенсации.

Значение текущего углового положения ротора ИР до компенсации гармонических составляющих погрешности определяется по формуле

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{U_{iH_{\sin}}}{U_{iH_{\cos}}}\right).$$

6 Для расчета скомпенсированного углового положения ротора ИР предварительно должны быть определены:

6.1. Амплитуда постоянной составляющей погрешности:

$$M_0 = \sum_{i=0}^n \frac{\alpha_i}{n}.$$

6.2. Амплитуда гармонических составляющих погрешности ( $M_N$ ):

$$A_N = \frac{2}{n+2} \sum_{i=0}^n \alpha_i \cos\left(\frac{2\pi Ni}{n}\right),$$

$$B_N = \frac{2}{n+2} \sum_{i=0}^n \alpha_i \sin\left(\frac{2\pi Ni}{n}\right),$$

$$M_N = \sqrt{A_N^2 + B_N^2},$$

где  $A_N$ ,  $B_N$  – амплитуды гармонических составляющих;  $N$  – номер гармонической составляющей, требующей компенсации.

6.3. Фаза гармонической составляющей погрешности:

$$\varphi_N = \frac{\pi}{2} \text{sign}(A_N) \text{ при } B_N = 0,$$

$$\varphi_N = \frac{\pi}{2} \text{sign}\left(\frac{A_N}{B_N}\right) \text{ при } B_N > 0,$$

$$\varphi_N = \frac{\pi}{2} \text{sign}\left(\frac{A_N}{B_N}\right) + \pi \text{ при } B_N < 0.$$

7. Общая формула для компенсации гармонических составляющих погрешности имеет вид

$$\alpha = \alpha_i - \left\{ M_0 + \sum_{N=1}^k \left[ M_N \sin\left( N \frac{2\pi}{n} + \varphi_N \right) \right] \right\}.$$

Однако, как уже отмечалось, нет необходимости проводить суммирование по всем гармоникам до  $k$ -й. Достаточно выбрать гармоники, которые оказывают наибольшее влияние на погрешность ИУП. В этом случае суммирование проводится для отдельных  $N$ .

На рис. 4 представлена амплитуда гармоник погрешностей ТО реального ИУП после нормирования выходных напряжений. На рис. 5 представлены графики погрешности ТО до тарировки, после нормирования выходных напряжений и после компенсации гармонических составляющих. В результате погрешность ИУП составила  $\approx 5''$ .

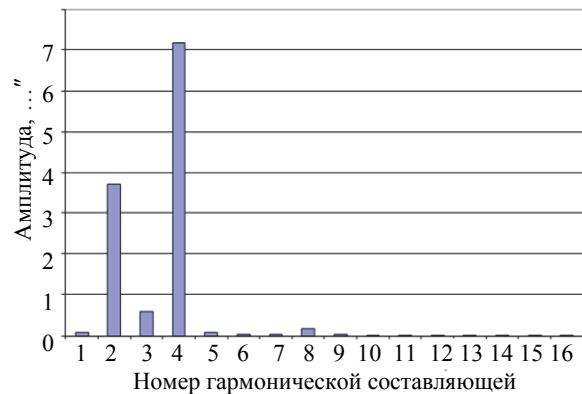


Рис. 4

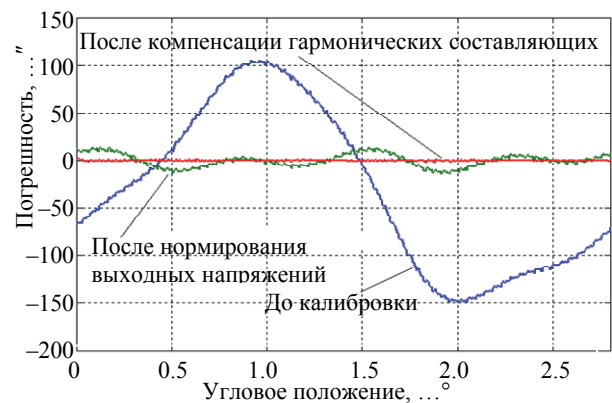


Рис. 5

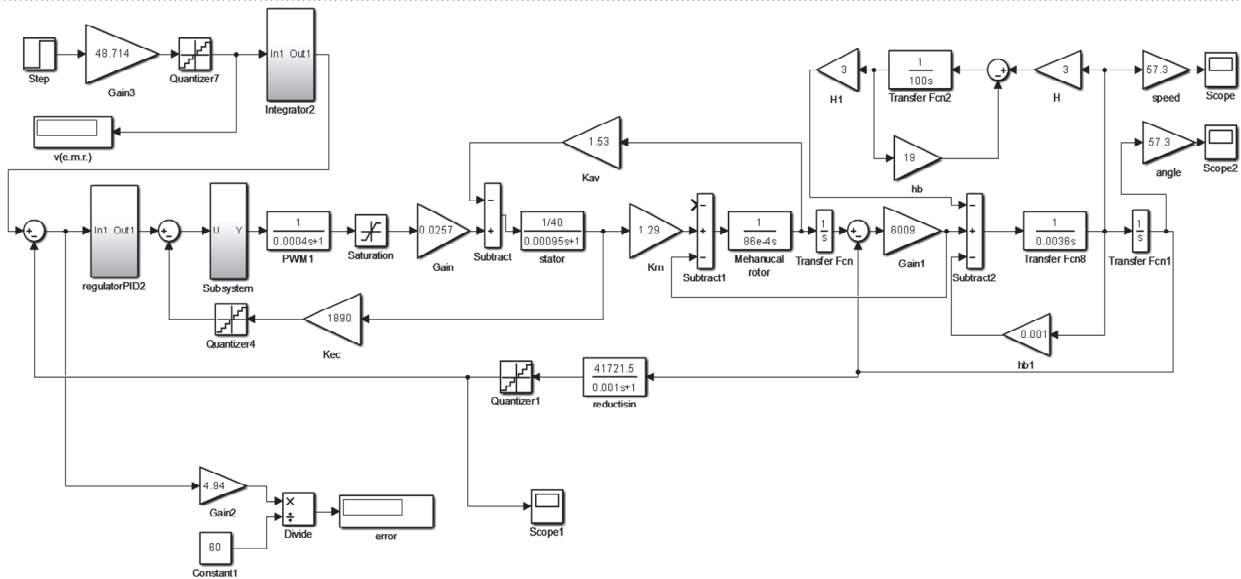


Рис. 6

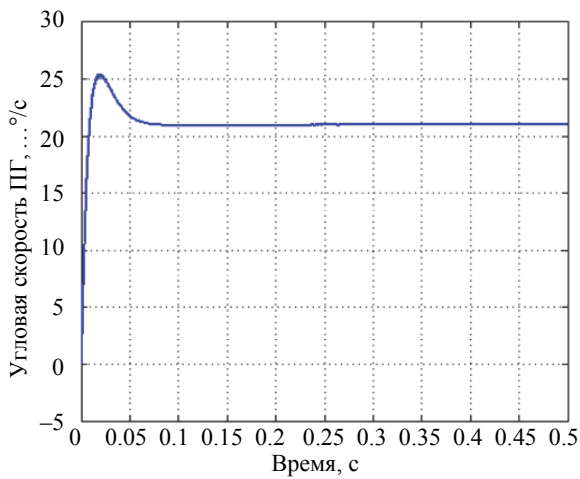


Рис. 7

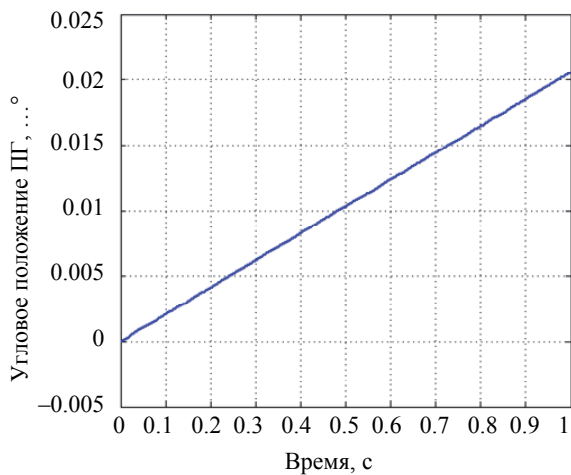


Рис. 8

**Моделирование работы электропривода.**

На рис. 6 представлена математическая модель ИЭП СГК, выполненная в пакете Matlab/Simulink. Математическая модель была построена, исходя из математического описания основных состав-

ных частей ИЭП, представленных ранее. При построении математической модели были учтены: ограничение напряжения источника питания (ИП) ключевого усилителя мощности (КУМ) по уровню, дискретность по времени и по уровню ИУП и измерителя тока. В качестве регулирующего устройства контура углового положения использовался ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном, в качестве регулирующего устройства контура тока – ПИ-регулятор. Регулирующие устройства были преобразованы в цифровой вид. Результаты моделирования обработки ИЭП заданной угловой скорости вращения ПГ 21 °/с и 0.0205 °/с представлены на рис. 7 и 8 соответственно и свидетельствуют о высокой точности и плавности полученной угловой скорости вращения ПГ.

Полученные результаты показывают, что система управления ИЭП СГК осуществляет обработку задаваемой угловой скорости вращения с высокой точностью, что обеспечивает высокое качество управляющего момента, создаваемого СГК. При этом для замыкания контура обратной связи не требуется измеритель угловой скорости, что положительным образом сказывается на габаритно-массовых характеристиках изделия. Подобный принцип построения систем управления может быть использован при разработке широкого спектра устройств, работающих в режиме обработки низких и сверхнизких угловых скоростей вращения, таких, как приводы робототехнических комплексов, управляющие устройства поворотные солнечных батарей, электроприводы систем наведения телескопов и многие др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учеб. пособие. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
2. Распопов В. Я. Силовые гироскопические комплексы в системах стабилизации и управления космических аппаратов. Образовательный аспект // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2014. № 3 (305). С. 127–131.
3. Разработка систем ориентации и стабилизации микроспутников / Н. А. Ивлев, С. О. Карпенко, А. С. Сивков и др. // *Механика, управление и информатика*. 2014. Т. 6, № 1(46). С. 43–60.
4. Сорокин А. В. Электромеханические исполнительные органы для систем ориентации малых космических аппаратов // *Гироскопия и навигация*. 1998. № 4. С. 81–88.
5. Инерционные исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов / В. П. Арефьев, Ф. В. Сорокин, Н. И. Башкеев, О. А. Кондратьев // *Гироскопия и навигация*. 1995. № 2 (9). С. 7–11.
6. Яковец О. Б. Математическое моделирование процессов управления силовыми гироскопическими приборами // *Завалишинские чтения 9: сб. докл. / ГУАП*. СПб., 2009. С. 196–201.
7. Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // *Доклады ТУСУР*. 2018. № 3. С. 103–108.
8. Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Низкоскоростной исполнительный электропривод устройства поворотной солнечной батареи // *Завалишинские чтения 17: сб. докл. / ГУАП*. СПб., 2017. С. 88–94.
9. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод гиродин // *Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск: Изд-во ТПУ*, 2016. С. 301–306.
10. Джукич Д. Й., Якимовский Д. О., Положенцев Д. С. Организация систем управления низкоскоростных электроприводов // *Завалишинские чтения 14: сб. докл. / ГУАП*. СПб., 2014. С. 139–141.
11. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Организация систем управления угловой скоростью вращения с помощью индукционных датчиков угла // *Молодеж. техника. Космос: тр. VI Общерос. молодежной науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т*. СПб., 2014. С. 185–186.
12. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие для вузов. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997.
14. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
15. Бураков М. В., Коновалов А. С. Нечеткий супервизор ПИД-регулятора // *Информационно-управляющие системы*. 2018. № 5. С. 13–21.
16. Бураков М. В., Шишлаков В. Ф., Коновалов А. С. Адаптивный нейросетевой пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор // *Вопросы радиоэлектроники*. 2018. №10. С. 86–92.
17. Бураков М. В., Кирпичников А. В. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // *Вестн. технол. ун-та*. 2015. Т. 18, № 4. С. 242–244.
18. Зайцев А. П. Компьютерный лабораторный практикум по теории линейных электрических цепей. Томск: Изд-во ТПУ, 2000. 126 с.
19. Каргу Л. И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 178 с.
20. Филипс Р. Характеристики управляющего гироскопа и их влияние на качество системы управления // *Вопросы ракетной техники*. 1969. № 8. С. 71–89.
21. Ахметжанов А. А., Лукиных Н. В. Индукционный редуктосин. М.: «Энергия», 1971. 80 с.
22. Разработка и калибровка преобразователей угла с микропроцессорной автокоррекцией / В. Д. Аксененко, О. К. Епифанов, Д. П. Лукьянов и др. // *Гироскопия и навигация*. 2005. № 4 (51). С. 72–82.
23. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. М.: Радио и связь, 1985.

D. S. Polozhentcev, K. A. Smirnov  
*JSC «Command Devices Research Institute»*

### CONTROL SYSTEM OF CONTROL MOMENT GYROSCOPE ELECTRIC DRIVE

*Describes the control system of the electric drive of a control moment gyroscope (CMG), which is the operating device of a spacecraft orientation system. The article contains a summary of the CMG composition, the principle of its operation and the main operation modes. It also presents the block diagram and describes the operation principle of the CMG electric drive control system that controls angular rotation velocity in the angle feedback mode. Also, the main CMG electric drive components are described — the angular velocity integrator, controllers, electric motor, power gyroscope and angle sensor. The article presents an algorithm for software compensation of angle sensor error harmonic components that are used in CMG electric drive and the results of its use obtained based on a real sample. An CMG electric drive mathematical model designed in Matlab/Simulink is also presented, as well as simulation results.*

**Control moment gyroscope, electric drive, angle feedback, angular velocity control system, controller, calibration, angle sensor, mathematical model**