

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ
КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА**М. А. ВАТУТИН^{1*}, А. И. КЛЮЧНИКОВ²¹ Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
*vatutinm@inbox.ru² 1-й Государственный испытательный космодром, г. Мирный, Архангельская обл., Россия

Аннотация. Рассмотрены маятниковый акселерометр компенсационного типа как электромеханическое измерительное устройство и факторы, влияющие на его точностные параметры. Показано, что ошибки обратного преобразователя, компенсирующего входное воздействие, не снижаются элементами цепи обратной связи. Разработана математическая модель ошибки компенсационного акселерометра в статическом режиме работы. Оценено влияние конструктивных и электронно-преобразовательных элементов акселерометра на общую погрешность измерения. Показано, что одним из основных источников погрешности преобразования измеряемого ускорения в электрический сигнал является устройство, суммирующее измеряемую величину и величину компенсирующего воздействия. Ошибка сравнения этих двух сигналов суммирующим устройством и определяет ошибку измерения входного ускорения акселерометром.

Ключевые слова: акселерометр, ошибка сравнения, компенсационный метод измерения, точностные параметры, радиоэлементы, источник опорного напряжения

Ссылка для цитирования: Ватутин М. А., Ключников А. И. Математическая модель погрешности компенсационного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 276—284. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE ERROR
OF THE COMPENSATION ACCELEROMETER**M. A. Vatutin^{1*}, A. I. Klyuchnikov²¹ A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vatutinm@inbox.ru² 1st State Test Cosmodrome, Mirny, Arkhangelsk region, Russia

Abstract. A compensation-type pendulum accelerometer is considered as an electromechanical measuring device, and factors affecting its accuracy characteristics are analyzed. It is shown that the errors of the inverse converter compensating the input action are not reduced by the elements of the feedback circuit. A mathematical model of the error of the compensation accelerometer in the static mode of operation is developed. The influence of the design and electronic-converter elements of the accelerometer on the overall measurement error is estimated. It is shown that one of the main sources of error in converting the measured acceleration into an electrical signal is a device summing the measured value and the value of the compensating effect. The error of comparing these two signals by the summing device determines the error of measuring the input acceleration by the accelerometer.

Keywords: accelerometer, comparison error, compensation measurement method, accuracy parameters of radio elements, accuracy parameters of the accelerometer, reference voltage source

For citation: Vatutin M. A., Klyuchnikov A. I. Mathematical model of the error of the compensation accelerometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 4. P. 276—284 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284.

Введение. Повышение точности и достоверности определения значений физических величин представляет собой одну из важных задач совершенствования измерительных устройств [1]. Решение этой задачи во многом определяет степень надежности и безопасности

функционирования сложных технических объектов. В большом количестве различных измерительных устройств используется компенсационный метод измерения [2, 3]. Достижение низкой погрешности измерения физической величины в классическом датчике обеспечивается высокоточными элементами, как механическими, так и электронными [4—7]. В то же время формирование окончательных точностных параметров измерительного устройства не от всех элементов одинаково зависит. Важную роль в компенсационных устройствах измерения играет аналоговое суммирующее устройство, в котором суммируются (сравниваются) измеряемый сигнал и компенсирующий сигнал обратной связи [8, 9].

Цель настоящей статьи — оценить влияние конструктивных и электронно-преобразовательных элементов акселерометра на общую погрешность измерения.

Влияние элементов маятникового акселерометра на погрешность измерения.

Одним из измерительных устройств, использующих компенсационный метод измерения, является маятниковый акселерометр (МА).

Структурно-динамическая схема маятникового акселерометра, функционирующего в линейном режиме, приведена на рис. 1, здесь: $a_{вх}$ — измеряемое входное ускорение; m — масса чувствительного элемента (ЧЭ); l — длина ЧЭ с торсионом; $M_{и}$ — момент инерции; $M_{ос}$ — момент обратной связи; ΔM — разность моментов $M_{и}$ и $M_{ос}$; СМУ — суммирующее устройство; W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 — передаточная функция соответственно ЧЭ, фотодатчика угла (ФДУ), усилителя-преобразователя (УП), преобразователя „напряжение—ток“ (ПНТ), датчика момента (ДМ); α — угол отклонения ЧЭ; $i_{фду}$ — ток на выходе фотодатчика угла; $u_{уп}$ — напряжение на выходе усилителя-преобразователя; $i_{ос}$ — ток обратной связи.

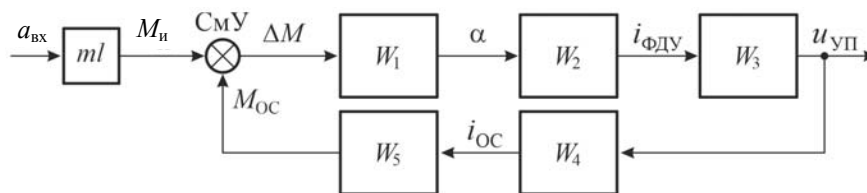


Рис. 1

Чувствительным элементом МА выступает подвижная масса маятника, согласно [3], его передаточная функция определяется выражением

$$W_1(p) = \frac{k_{чэ}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}, \tag{1}$$

где $k_{чэ} = 1/C$ — коэффициент передачи подвижной части ЧЭ; $T_1 = \sqrt{J/C}$ — постоянная времени подвижной части ЧЭ; $\xi = \mu/2\sqrt{JC}$ — коэффициент затухания; C — коэффициент жесткости торсионного подвеса; J — момент инерции; μ — коэффициент демпфирования; p — оператор Лапласа.

Передаточные функции ФДУ, УП, ПНТ и ДМ, изображенные на рис. 1, соответственно имеют вид

$$W_2(p) = \frac{k_{фду}}{T_{фду} p + 1}, W_3(p) = \frac{k_{уп}}{T_{уп} p + 1}, W_4(p) = \frac{k_{пнт}}{T_{пнт} p + 1}, W_5(p) = \frac{k_{дм}}{T_{дм} p + 1}, \tag{2}$$

где $k_{фду}, k_{уп}, k_{пнт}, k_{дм}$ — коэффициент передачи фотодатчика угла, усилителя-преобразователя, преобразователя „напряжение—ток“, датчика момента; $T_{фду}, T_{уп}, T_{пнт}, T_{дм}$ — постоянные времена.

Значение каждого из параметров $T_{фду}, T_{уп}, T_{пнт}$ и $T_{дм}$ много меньше постоянной времени $T_{чэ}$. Поэтому в первом приближении фотодатчик угла, усилитель-преобразователь, преобразователь „напряжение—ток“ и датчик момента можно считать безынерционными

$$W_2(p) = k_{ФДУ}, W_3(p) = k_{УП}, W_4(p) = k_{ПНТ}, W_5(p) = k_{ДМ}. \quad (3)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы будет

$$W_1(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}, \quad (4)$$

где $k = k_{ЧЭ} k_{ФДУ} k_{УП}$ — коэффициент передачи прямой цепи преобразования. Передаточная функция цепи обратной связи имеет вид

$$W_{OC}(p) = W_4(p) \cdot W_5(p) = \frac{k_{ПНТ}}{T_{ПНТ} p + 1} \cdot \frac{k_{ДМ}}{T_{ДМ} p + 1} \quad (5)$$

и в первом приближении

$$W_{OC}(p) = k_{ПНТ} \cdot k_{ДМ}. \quad (6)$$

Если в качестве входного (задающего) воздействия рассматривать $M_{и}$, а в качестве выходной (управляющей) величины — M_{OC} , то передаточная функция замкнутой системы будет соответствовать следующему выражению:

$$\Phi(p) = \frac{M_{OC}}{M_{и}} = \frac{W_1^*(p)}{1 + W_1^*(p) \cdot W_{OC}(p)}, \quad (7)$$

где $W_1^*(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$.

Рассмотренные выше соотношения справедливы, когда элементы конструкции МА (см. рис. 1) обладают идеальными параметрами и в них отсутствуют погрешности преобразования сигнала — паразитные смещения, дрейфы и другие изменения параметров элементов, вызванные воздействием различных дестабилизирующих факторов. В реальных элементах конструкции МА указанные погрешности присутствуют как собственная нестабильность параметров. Снизить влияние погрешности каждого из элементов акселерометра на общую погрешность можно, охватив его отрицательной обратной связью, что с успехом и применяется в компенсационных маятниковых акселерометрах.

В работе [10] показано влияние параметров элементов прямой цепи преобразования $W_1^*(p)$ компенсационного маятникового акселерометра и цепи его обратной связи $W_{OC}(p)$ на стабильность передаточной функции

$$\delta_{\Phi(p)} = \frac{1}{(1 + W_1^*(p) W_{OC}(p))} \delta_{W_1^*(p)} - \delta_{W_{OC}(p)}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что при охвате системы цепью отрицательной обратной связи относительное изменение передаточной функции $\delta_{\Phi(p)}$, вызванное относительным изменением $\delta_{W_1^*(p)}$ передаточной функции прямой цепи преобразования $W_1^*(p)$, уменьшается в $[1 + W_1^*(p) \cdot W_{OC}(p)]$ раз, а относительное изменение передаточной функции $\delta_{W_{OC}(p)}$, вызванное относительным изменением передаточной функции цепи обратной связи $W_{OC}(p)$, остается без изменений. Это определяет необходимость очень тщательно подходить к конструированию датчика момента (обратного преобразователя) и обеспечению стабильности параметров элементов его составляющих [11—13].

Каждый из элементов структурной схемы МА, изображенной на рис. 1, вносит свою долю в общую погрешность маятникового акселерометра как измерительного прибора. В соответствии с выражением (8) погрешности одних элементов снижаются, а других — остаются без изменения и оказывают ключевое влияние на общую погрешность измерения, соответственно эти элементы устройства будут ключевыми для снижения погрешности.

Определение этих ключевых элементов, как электронных, так и электромеханических, оценка их влияния на суммарную погрешность измерения и принятие мер по ее снижению являются важными задачами.

Математическая модель погрешности маятникового акселерометра. Типовая электрическая схема маятникового акселерометра с фотодатчиком угла и магнитоэлектрическим датчиком момента показана на рис. 2 (ИТ — источник тока; М — маятник; SD — светодиод; DA — операционный усилитель).

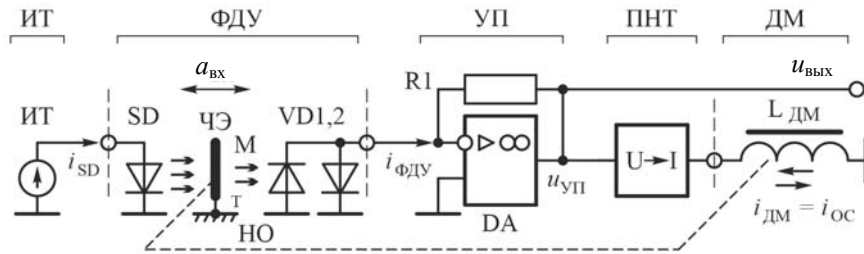


Рис. 2

Маятник связан с неподвижным основанием (НО) через упругий торсион (Т). При воздействии ускорения $a_{вх}$ на подвижную массу возникает момент инерционных сил

$$M_{и} = ml \cdot a_{вх} . \tag{9}$$

В результате воздействия ускорения маятник отклоняется на некоторый угол α , измеряемый фотодатчиком угла и преобразуется в электрический ток $i_{фду}$, который усиливается линейным усилителем-преобразователем. Усиленный сигнал — выходное напряжение $u_{вых}$ — является выходным и одновременно поступает в цепь компенсации — подается на ПНТ, с выхода которого, в виде тока обратной связи $i_{ос}$, поступает на ДМ. Последний создает момент обратной связи

$$M_{ос} = i_{ос}k_{дм} . \tag{10}$$

Реальная система с обратной связью работает с ошибкой ΔM

$$\Delta M = M_{и} - M_{ос} . \tag{11}$$

На структурной схеме МА (см. рис. 1) ошибка ΔM формируется как разность измеряемого момента инерции $M_{и}$ и компенсирующего момента обратной связи $M_{ос}$ в суммирующем устройстве СМУ. Конструктивно (см. рис. 2) суммирующее устройство представляет маятник, на который в пространстве одновременно с противоположными знаками воздействуют моменты $M_{и}$ и $M_{ос}$. Сигнал ошибки ΔM формируется на выходе фотодатчика ФДУ в виде тока $i_{фду}$.

Структурно-динамическая схема маятникового акселерометра с выходным сигналом в виде тока $i_{фду}$ показана на рис. 3

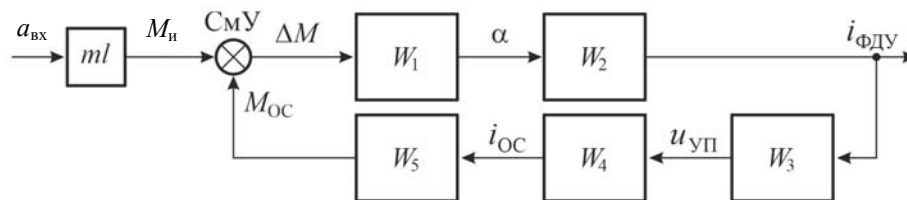


Рис. 3

В этом случае передаточная функция замкнутой системы будет

$$\Phi^*(p) = \frac{M_{ос}}{M_{и}} = \frac{W_1^{**}(p)}{1 + W_1^{**}(p) \cdot W_{ос}^*(p)} , \tag{12}$$

а передаточные функции $W_1^{**}(p)$ и $W_{ос}^*(p)$ будут

$$W_1^{**}(p) = \frac{k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1};$$

$$W_{\text{ОС}}^*(p) = \frac{k_{\text{УП}} \cdot k_{\text{ПНТ}} \cdot k_{\text{ДМ}}}{T_{\text{ДМ}} p + 1} \approx k_{\text{УП}} \cdot k_{\text{ПНТ}} \cdot k_{\text{ДМ}} = k_{\text{ОС}}.$$

После преобразования получим

$$\Phi^*(p) = \frac{ml \cdot k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1 + k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}}}. \quad (13)$$

В установившемся режиме $p = 0$, соответственно

$$\frac{i_{\text{ФДУ}}}{a_{\text{вх}}} = \frac{ml \cdot k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1}, \quad (14)$$

а ток фотодатчика

$$i_{\text{ФДУ}} = a_{\text{вх}} \cdot \frac{ml \cdot k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1}. \quad (15)$$

Каждый из элементов суммирующего устройства в той или иной степени подвержен воздействию различных внешних факторов, приводящих к изменению значений его параметров, изначально принятых для расчета как исходные. В общем виде для функции $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ влияние отклонения параметров Δx_n от номинального значения на изменение выходной величины Δy определяется как сумма модулей произведений частных производных по каждому параметру $\partial F / \partial x_n$ и изменения влияющих величин Δx_n [14]:

$$\Delta y = \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_n} \right| \Delta x_n.$$

Применяя последнее выражение для работы МА, не будем учитывать две составляющие — значение входного ускорения $a_{\text{вх}}$, поскольку это измеряемая величина, и массу m , поскольку исходя из общих соображений можно предположить, что под действием дестабилизирующих факторов масса маятника не изменяется. В этом случае для рассматриваемого маятникового акселерометра $y = F(l, k_{\text{чЭ}}, k_{\text{ОС}}, k_{\text{ФДУ}})$, а нестабильность $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ фотодатчика угла будет

$$\Delta i_{\text{ФДУ}} = \left| \frac{\partial F}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial F}{\partial k_{\text{чЭ}}} \right| \Delta k_{\text{чЭ}} + \left| \frac{\partial F}{\partial k_{\text{ФДУ}}} \right| \Delta k_{\text{ФДУ}} + \left| \frac{\partial F}{\partial k_{\text{ОС}}} \right| \Delta k_{\text{ОС}}. \quad (16)$$

Определим частные производные, используемые в выражении (16):

$$1) \frac{\partial F}{\partial l} = \frac{(a_{\text{вх}} \cdot m \cdot k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}) \cdot (k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)}{(k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2};$$

$$2) \frac{\partial F}{\partial k_{\text{чЭ}}} = \frac{a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{ФДУ}}}{(k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2}; \quad 3) \frac{\partial F}{\partial k_{\text{ФДУ}}} = \frac{a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{чЭ}}}{(k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2};$$

$$3) \frac{\partial F}{\partial k_{\text{ОС}}} = \frac{(a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}) \cdot (k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}})}{(k_{\text{чЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2}.$$

Подставим полученные значения в выражение (16)

$$\begin{aligned} \Delta i_{\text{ФДУ}} = & \frac{(a_{\text{ВХ}} \cdot m \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}) \cdot (k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)}{(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2} \cdot \Delta l + \\ & + \frac{a_{\text{ВХ}} \cdot ml \cdot k_{\text{ФДУ}}}{(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2} \cdot \Delta k_{\text{ЧЭ}} + \frac{a_{\text{ВХ}} \cdot ml \cdot k_{\text{ЧЭ}}}{(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2} \cdot \Delta k_{\text{ФДУ}} + \\ & + \frac{(a_{\text{ВХ}} \cdot ml \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}) \cdot (k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}})}{(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1)^2} \cdot \Delta k_{\text{ОС}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Нестабильность работы фотодатчика угла $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ фактически определяет как температурную стабильность коэффициента преобразования $\Delta k_{\text{пр.а}}$ акселерометра, так и дрейф (смещение) нуля $\Delta a_{\text{ВХ}}$. В таблице показаны типовые значения этих параметров для некоторых маятниковых акселерометров.

Основные параметры типовых МЭМС-акселерометров

Параметр	Акселерометр (производитель)			
	А4 (Litton, США)	АК-5 (НПО „МИЗА“)	А-12 („Раменское“ ПКБ)	Д-10 (ЦНИИ „Электроприбор“)
$\Delta k_{\text{пр.а}}, 1/^\circ\text{C}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$(3-10) \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
$\Delta a_{\text{ВХ}}, \text{м/с}^2$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$

Типовые значения температурной погрешности коэффициента преобразования $\Delta k_{\text{пр.а}}$ и смещения нуля $\Delta a_{\text{ВХ}}$ показывают, что нестабильность работы фотодатчика $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ находится на уровне $(1-10) \cdot 10^{-6}$ мА/°С.

В соответствии с обратной задачей теории погрешностей [15] необходимо определить абсолютные погрешности аргументов функции, чтобы абсолютная погрешность функции не превышала заданной величины. Эта задача математически не определена, так как заданную предельную погрешность $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ функции $y = F(l, k_{\text{ЧЭ}}, k_{\text{ОС}}, k_{\text{ФДУ}})$ можно обеспечить, по-разному устанавливая предельные абсолютные погрешности ее аргументов. Наиболее часто обратная задача решается согласно так называемому принципу равных влияний: принимается, что все частные дифференциалы выражения (16) одинаково влияют на образование общей абсолютной погрешности. Соответственно любая из составляющих выражения (16) должна быть меньше всей суммы и в среднем иметь значение на уровне $\frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$ или меньше:

— нестабильность линейных размеров l маятника: $\left| \frac{\partial F}{\partial l} \right| \Delta l \leq \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$;

— нестабильность коэффициента $k_{\text{ЧЭ}}$: $\left| \frac{\partial F}{\partial k_{\text{ЧЭ}}} \right| \Delta k_{\text{ЧЭ}} \leq \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$;

— нестабильность коэффициента $k_{\text{ФДУ}}$: $\left| \frac{\partial F}{\partial k_{\text{ФДУ}}} \right| \Delta k_{\text{ФДУ}} \leq \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$;

— нестабильность коэффициента $k_{\text{ОС}}$: $\left| \frac{\partial F}{\partial k_{\text{ОС}}} \right| \Delta k_{\text{ОС}} \leq \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$.

Составляющая Δl в выражении отражает механическую стабильность чувствительного элемента акселерометра и в первую очередь зависит от коэффициента линейного расширения применяемого материала.

Составляющая $\Delta k_{\text{ОС}}$ отражает стабильность датчика момента — электромагнитного преобразователя „электрический ток—магнитный поток“ и зависит от магнитных свойств и

температурной стабильности сердечника и обмотки, а также от стабильности работы электронных блоков усилителя-преобразователя и преобразователя „напряжение—ток“.

Составляющие $\Delta k_{\text{ЧЭ}}$ и $\Delta k_{\text{ФДУ}}$ отражают стабильность работы чувствительного элемента и фотодатчика угла. Схемотехника и точностные параметры ЧЭ и ФДУ в настоящей статье не рассматриваются, но схемотехнической основой, определяющей точностные параметры этих устройств, является такое электронное устройство, как источник опорного напряжения (ИОН). Дрейф выходного напряжения типового нетермостатированного ИОН находится на уровне $(1—10) \cdot 10^{-6} \text{ В/}^\circ\text{С}$ [16, 17], что определяет дрейф работы электронных блоков ЧЭ и ФДУ на таком же уровне стабильности.

Заключение. Общая абсолютная погрешность акселерометра образуется как сумма погрешностей линейных размеров маятника l и коэффициентов преобразования чувствительного элемента $k_{\text{ЧЭ}}$, обратной связи $k_{\text{ОС}}$ и фотодатчика угла $k_{\text{ФДУ}}$.

Точностные параметры ЧЭ и ФДУ определяются дрейфом ИОН, значение которого находится на уровне $(1—10) \cdot 10^{-6} \text{ В/}^\circ\text{С}$ ($1—10 \text{ ppm}$), что определяет погрешность ЧЭ и ФДУ на уровне единиц ppm.

Для снижения температурной погрешности коэффициента преобразования $\Delta k_{\text{пр.а}}$ и смещения нуля $\Delta a_{\text{вх}}$ акселерометра необходимо:

— применять качественные и стабильные материалы как для маятника l , так и для электромагнитного преобразователя ДМ;

— применять более стабильные ИОН и совершенствовать схемотехнику блоков УП, ПНТ, ФДУ;

— применять интеллектуальные режимы работы акселерометра, в которых по прямым или косвенным признакам функционирования элементов акселерометра возможно значительное снижение погрешности измерения ускорения.

Значительное улучшение точностных параметров одного из ключевых элементов акселерометра не приводит к существенному улучшению общих точностных параметров. К решению этой задачи необходимо подходить комплексно и одновременно улучшать параметры каждого из критичных элементов устройства, что составляет определенные и известные конструктивные и технологические трудности.

Применение более качественных механических материалов и более стабильных радиоэлементов, чем в существующих элементах маятникового акселерометра, обеспечит совершенствование конструкции и улучшение параметров маятниковых акселерометров.

Построение интеллектуального маятникового акселерометра требует поиска прямых или косвенных признаков функционирования акселерометра, по которым возможно найти значение искомого параметра и в дальнейшем скорректировать. Так, в работах [18—20] в качестве сравниваемой физической величины выбран временной интервал (частота), который непосредственно в определении коэффициента $k_{\text{пр.а}}$ не участвует, но однозначно позволяет определить его текущее значение. Фактически в этих работах временной интервал выбран в качестве параметра, при помощи которого осуществляется сравнение измеряемой величины и компенсирующего воздействия, т.е. аналог блока ЧЭ и ФДУ, а генераторы, стабилизированные кварцевым резонатором, как известно, обладают высокой стабильностью генерируемой частоты [21]. Стабильность кварцевых генераторов $\Delta f/\Delta T$ в целом составляет $(1,0—10,0) \cdot 10^{-8} \text{ Гц/}^\circ\text{С}$, или $(1,0—10,0) 10^{-2} \text{ ppm}$. Это значение стабильности частоты в среднем на два-три порядка выше стабильности параметров лучших радиоэлементов (металлофольговых резисторов) и нетермостатированных ИОН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубовской В. Б., Кисленко К. В., Пшеняник В. Г. Методика повышения точности навигационного обеспечения космических аппаратов, оснащенных высокочувствительными акселерометрами // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 590—595.
2. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем. М.: Мир, 1992. 480 с.
3. Лучко С. В., Ватутин М. А. Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 62.
4. Лучко С. В., Балувев С. Ю., Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Ключников А. И., Ефимов В. П. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43—46.
5. Резисторы постоянные металлофольговые P2-67 [Электронный ресурс]: <<http://reom.ru/katalog/18/16/>>. (дата обращения 11.09.2022 г.)
6. Десять причин выбрать фольговые резисторы Vishay для вашего проекта [Электронный ресурс]: <<https://www.compel.ru/lib/54355>>. (дата обращения 11.09.2022 г.)
7. Арбузов В. П. Измерительные цепи прямого преобразования для емкостных акселерометров и гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 997—1004.
8. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Изд. дом „Додэка-XXI“, 2005.
9. Депутатова Е. А., Гнусарев Д. С., Калихман Д. М. Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 6. С. 1091—1098. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098.
10. Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Буянкин М. П., Петухов А. Б., Ключников А. И. Влияние параметров микромеханического акселерометра на стабильность его передаточной функции // Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. „Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации“. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. Т. 3. С. 153—157.
11. Скоробогатов В. В. Проблемы разработки широкодиапазонного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и пути их решения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 10. С. 17—28.
12. Волков В. Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 2(87). С. 288—295.
13. Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Лепешкина Е. С. Бортовой комплекс управления для наноспутника CubeSat на базе технологии „система на кристалле“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 403—408.
14. Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Е. М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
15. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966.
16. Пушкарев М. Интегральные источники опорного напряжения // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 71—76.
17. Староверов К. Новое семейство прецизионных ИОН REF50XX // Новости электроники. 2008. № 14. С. 22—26.
18. Буянкин М. П., Ватутин М. А., Ключников А. И. Адаптация маятникового акселерометра компенсационного типа к возмущающим факторам космического пространства // Вестн. Российского нового университета. Сер. „Сложные системы: модели, анализ и управление“. 2020. Вып. 1/2020. С. 55—59.
19. Ватутин М. А., Буянкин М. П., Ключников А. И. Методика определения параметров маятникового акселерометра по его частотной характеристике // Сб. тр. молодых ученых 46 ЦНИИ Минобороны России. М., 2016. 115 с.
20. Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Трофимов И. А., Буянкин М. П. Имитационная модель интеллектуального акселерометра // Сб. тр. ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. № 657. С. 87—96.

21. Кварцевые генераторы, фильтры, резонаторы, кристаллические элементы. Прайс-лист. СПб: ОАО „Морион“, 2012.

Сведения об авторах

- Михаил Алексеевич Ватутин** — канд. техн. наук, доцент, ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления, E-mail: vatutinm@inbox.ru
- Алексей Игоревич Ключников** — соискатель; 1-й ГИК МО РФ, кафедра автономных систем управления; старший инженер-испытатель; E-mail: keynikov198@gmail.com

Поступила в редакцию 11.11.22; одобрена после рецензирования 21.11.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

- Dubovskoy V.B., Kislenco K.V., Pshenyanik V.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 7(61), pp. 590–595. (in Russ.)
- Asch G. *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Paris, Dunod, 1987.
- Luchko S.V., Vatutin M.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 6(48), pp. 62. (in Russ.)
- Luchko S.V., Baluyev S.Yu., Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Klyuchnikov A.I., Efimov V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, no. 12(56), pp. 43–46. (in Russ.)
- <http://reom.ru/katalog/18/16>. (in Russ.)
- <https://www.compel.ru/lib/54355>. (in Russ.)
- Arbuzov V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 11(62), pp. 997–1004. (in Russ.)
- Volovich G.I. *Skhemitotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv* (Circuitry of Analog and Analog-Digital Electronic Devices), Moscow, 2005. (in Russ.)
- Deputatova E.A., Gnusarev D.S., Kalikhman D.M. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, no. 6(18), pp. 1091–1098, DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098. (in Russ.)
- Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Buyankin M.P., Petukhov A.B., Klyuchnikov A.I. *Problemy sozdaniya i primeneniya malyykh kosmicheskikh apparatov i robototekhnicheskikh sredstv v interesakh Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* (Problems of Creation and Application of Small Spacecraft and Robotic Means in the Interests of the Armed Forces of the Russian Federation), Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2016, vol. 3, April, pp. 153–157. (in Russ.)
- Skorobogatov V.V. *News of TulSU. Technical sciences*, 2016, no. 10, pp. 17–28. (in Russ.)
- Volkov V.L. *Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev*, 2011, no. 2(87), pp. 288–295. (in Russ.)
- Khanov V.Kh., Shakhmatov A.V., Chekmarev S.A., Lepeshkina E.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 5(61), pp. 403–408. (in Russ.)
- Dushin E.M., ed., *Osnovy metrologii i elektricheskoye izmereniya* (Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements), Leningrad, 1987. (in Russ.)
- Demidovich B.P., Maron I.A. *Osnovy vychislitel'noy matematiki* (Fundamentals of Computational Mathematics), Moscow, 1966. (in Russ.)
- Pushkarev M. *Components and Technologies*, 2007, no. 6, pp. 71–76. (in Russ.)
- Staroverov K. *Electronics News*, 2008, no. 14, pp. 22–26. (in Russ.)
- Buyankin M.P., Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. *Bulletin of the Russian New University. The series "Complex systems: models, analysis and management"*, 2020, no. 1/2020, pp. 55–59. (in Russ.)
- Vatutin M.A., Buyankin M.P., Klyuchnikov A.I. *Sbornik trudov molodykh uchenykh 46 TSNII Minoborony Rossii* (Collection of Works of Young Scientists of the 46 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia), Moscow, 2016, 115 p. (in Russ.)
- Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Trofimov I.A., Buyankin M.P. *Collection of works of the A.F. Mozhaisky VKA*, St. Petersburg, 2017, no. 657, pp. 87–96. (in Russ.)
- Kvartsevyye generatory, fil'try, rezonatory, kristallicheskiye elementy* (Quartz Generators, Filters, Resonators, Crystal Elements), Price list, St. Petersburg, 2012. (in Russ.)

Data on authors

- Mikhail A. Vatutin** — PhD, Associate Professor, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems, E-mail: vatutinm@inbox.ru
- Alexey I. Klyuchnikov** — Applicant; 1st State Test Cosmodrome, Department of Autonomous Control Systems; Senior Test Engineer; E-mail: keynikov198@gmail.com

Received 11.11.22; approved after reviewing 21.11.22; accepted for publication 28.02.23.