

Маятниковый построитель вертикали с релейным управлением

Петрухин В.А.*, Мельников В.Е.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: riksorge@me.com*

***e-mail: ve_melnik@mail.ru*

Аннотация

В статье рассматриваются возможности повышения устойчивости физического или математического маятника к возмущающим горизонтальным ускорениям основания путем формирования корректирующих воздействий на маятник от акселерометра и введения релейного управления уровнем компенсирующего сигнала. Проведенные исследования и результаты имитационного моделирования свидетельствуют о реализуемости и высоких точностных характеристиках такого маятникового построителя вертикали. На его основе может быть реализован ряд технических приложений в задачах управления, ориентации и навигации ЛА различного класса и назначения.

Ключевые слова: маятниковый построитель вертикали, маятник, акселерометр, релейное управление

Характерной особенностью и преимуществом предложенного маятникового построителя вертикали (МПВ) является то, что при достаточно высокой точности в

нем не возникают накапливающиеся во времени ошибки, свойственные каналам построителей вертикали в БИНС, работающим в автономном режиме [1,3,4].

В работе для выявления специфики и основных особенностей МПВ рассмотрен один из каналов маятника с корректирующим акселерометром. Вторым канал реализуется аналогичным образом. В дополнение к ранее проведенным исследованиям [2], для расширения возможностей МПВ предложен режим релейного управления движением маятника в окрестности вертикали места.

На рисунке 1 представлена кинематическая схема одноосного маятника с акселерометром расположенном на оси подвеса маятника и участвующего во всех его угловых движениях. При этом примем, что при наличии канала коррекции углы отклонения маятника от вертикали малы, т.е. $\sin \alpha_M \approx \alpha_M$, $\cos \alpha_M \approx 1$.

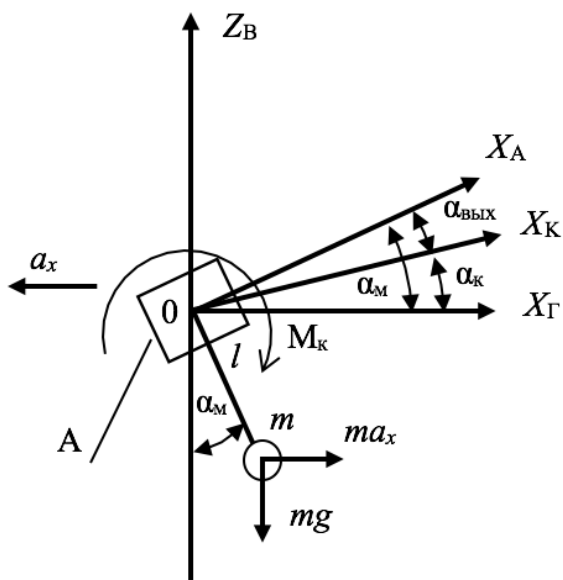


Рис. 1 – Кинематическая схема корректируемого маятника.

На этой схеме введены следующие обозначения: X_A – ось чувствительности акселерометра; X_G , Z_B – горизонтальная и вертикальная ось; X_K – продольная или

поперечная строительные оси ЛА, отклонение которых от плоскости горизонта измеряется; $\alpha_{\text{ВЫХ}} = \alpha_{\text{М}} \pm \alpha_{\text{К}}$ – выходной сигнал, определяемый линейной комбинацией углов $\alpha_{\text{М}}$ и $\alpha_{\text{К}}$, где: $\alpha_{\text{К}}$ – угол отклонения корпуса МПВ от горизонтали, $\alpha_{\text{М}}$ – угол отклонения маятника от вертикали; a_x – горизонтальное ускорение; $M_{\text{К}}$ – корректирующий момент датчика момента; m – масса математического маятника; l – длина маятника; g – ускорение силы тяжести, А - акселерометр.

На рисунке 2 представлена структурная схема МПВ, в соответствии с рисунком 1.

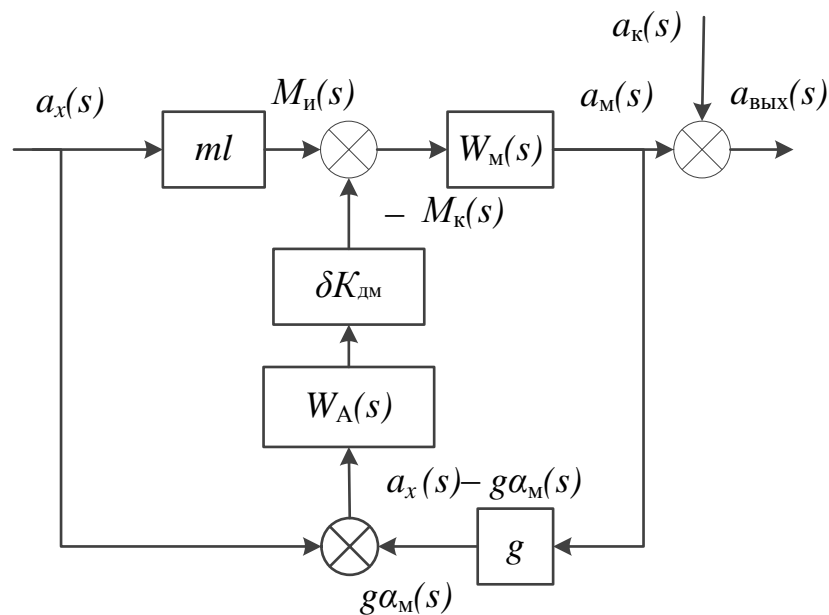


Рис. 2 – Базовая структурная схема одноканального МПВ с корректирующим акселерометром.

Здесь обозначены: маятник с передаточной функцией (ПФ) $W_{\text{М}}(s) = K_{\text{М}} / (T_{\text{М}}^2 s^2 + 2\zeta_{\text{М}} T_{\text{М}} s + 1)$; акселерометр с ПФ $W_{\text{А}}(s) = K_{\text{А}} / (T_{\text{А}}^2 s^2 + 2\zeta_{\text{А}} T_{\text{А}} s + 1)$, где K_i , T_i , ζ_i – соответственно коэффициент усиления, постоянная времени и относительный

коэффициент демпфирования корректирующих элементов, индексы i которых для соответствующих элементов принимают их обозначения: А для акселерометра, М – маятника; $M_{\text{и}}$ – инерционный момент, $M_{\text{к}}$ – момент коррекции; δ – безразмерный коэффициент $0 < \delta < 1$, характеризующий уровень корректирующего сигнала по отношению к возмущающему маятник ускорению; $K_{\text{дм}}$ – коэффициент датчика момента, условие работы при этом $K_{\text{дм}}K_{\text{А}} = ml$.

Тогда угол $\alpha_{\text{м}}$ отклонения маятника от вертикали определяется следующим образом:

$$\alpha_{\text{м}}(s) = \frac{a_x(1 - \delta W_{\text{А}}(s)/K_{\text{А}})mlW_{\text{М}}(s)}{1 - \delta gmlW_{\text{М}}(s)W_{\text{А}}(s)/K_{\text{А}}}. \quad (1)$$

На рисунке 3 - результаты исследования переходных характеристик маятника по рисунку 2 в среде *Matlab – Simulink* с параметрами маятника: $m = 10^{-2}$ кг; $l = 0.05$ м; $\zeta_{\text{М}} = 0,3$. Рассмотрена реакция маятника на скачкообразное изменение ускорения, величиной $1g$, при отношении собственных круговых частот акселерометра и маятника $\omega_{\text{А}}/\omega_{\text{М}} = 100$ и вариации декремента затухания $\zeta_{\text{А}}$ акселерометра в диапазоне от 0,1 до 0,7.

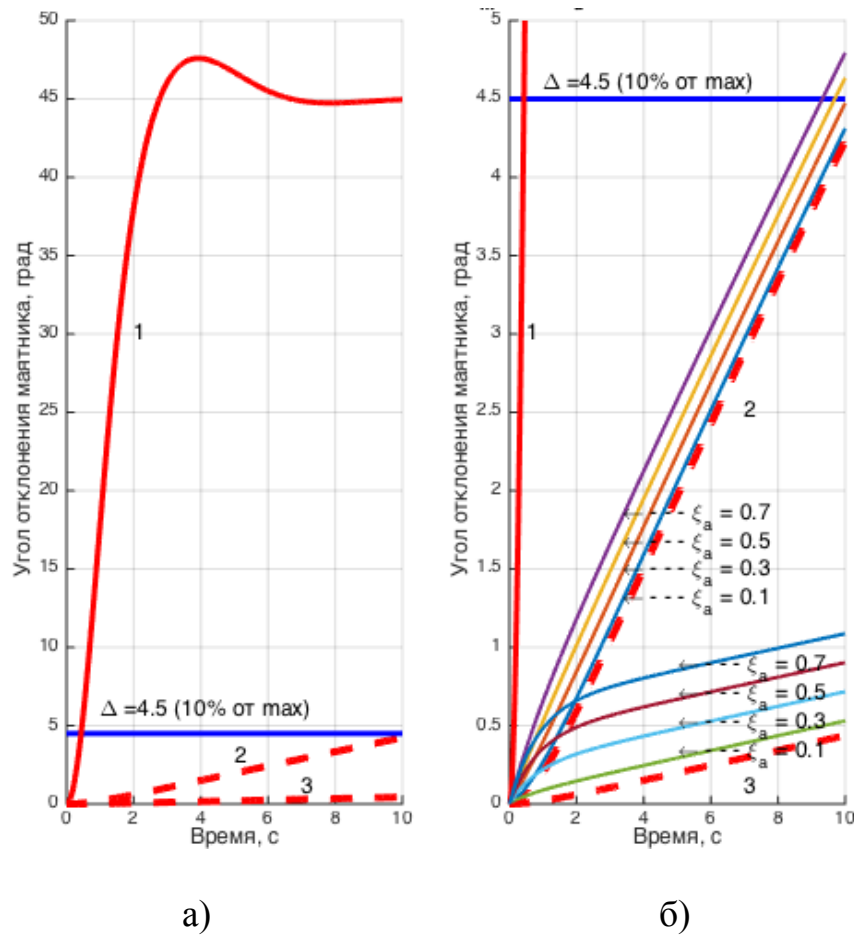


Рис. 3 – Зависимости переходных функций от изменения параметров корректирующего акселерометра

На рисунке 3а): 1 - некорректируемый маятника; 2, 3 – маятники с «глубиной» коррекции $\delta = 0,99$ и $\delta = 0,999$ соответственно.

На рисунке 3б) начальный участок характеристики переходной функции по рисунку 3а) от 0 до $4,5^\circ$ отклонения маятника

Анализ результатов моделирования показывает: -что отклонения маятника заметно уменьшаются при снижении ζ_A ; - что, если $\omega_A \gg \omega_M$, $T_A = 1/\omega_A \ll T_M = 1/\omega_M$, акселерометр можно считать безынерционным звеном. Тогда из (1) получим:

$$\alpha_M(s) = \frac{a_x(s)(1 - \delta)}{g(T_{\text{ЭКВ}}^2 s^2 + 2\zeta_{\text{ЭКВ}} T_{\text{ЭКВ}} s + 1 - \delta)} \quad (2)$$

Это уравнение эквивалентного маятника с постоянной времени – $T_{\text{ЭКВ}} = \frac{T_M}{\sqrt{(1-\delta)}}$,

эквивалентной длиной – $l_{\text{ЭКВ}} = l_M / (1 - \delta)$ и эквивалентным относительным

коэффициентом демпфирования – $\zeta_{\text{ЭКВ}} = \frac{\zeta_M}{\sqrt{(1-\delta)}}$.

То есть, за счет коррекции математический маятник превратился в эквивалентный маятник, движение которого описывается апериодическим звеном, с существенно возросшей постоянной времени $T_{\text{ЭКВ}}$. Но в установившемся режиме он, как и исходный маятник стремится к кажущейся вертикали.

Существенное увеличение постоянной времени эквивалентного маятника позволяет использовать его в качестве индикатора вертикали на небольших интервалах времени.

Как следует из рисунка 3б) при «глубине» коррекции $\delta = 0,99$ (семейство характеристик под номером 2) и при вариации декремента затухания $\zeta_A = 0,1 \div 0,7$ маятник достигнет отклонения от вертикали $\alpha_M = 4,5^\circ$, что соответствует 0.1 от $\alpha_{\text{max}} = 45^\circ$ примерно за 10 с.

При $\delta = 0,999$ при тех же условиях максимальное отклонение не превысит 1° (семейство 3).

Если по условиям работы ЛА длительность неустановившегося режима полета не превосходит 10 с, а допустимая погрешность не более Δ (в нашем случае $\Delta = 0,1 \alpha_{\text{max}} = 4,5^\circ$), то в течение 10 с такой маятник можно считать квазибезвозмущаемым на этом интервале времени.

На рисунке 4 представлена структурная схема МПВ, дополненная контуром релейного управления, позволяющая существенно снизить отклонение маятника от

вертикали, за счет введения управления знаком корректирующего воздействия при достижении предельно допустимого отклонения маятника от вертикали места.

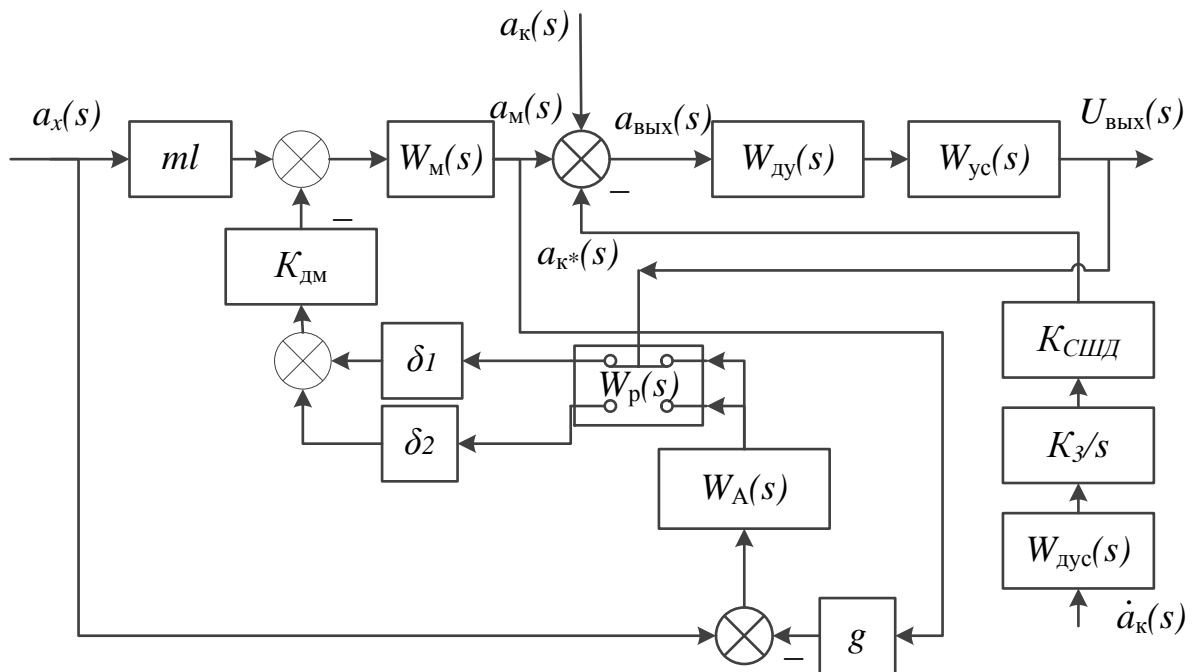


Рис. 4 – Структурная схема одноканального МПВ с релейным управлением

Дополнительно к базовым элементам по рисунку 2 здесь введены: датчик угла $W_{д\gamma}(s)$, усилитель $W_{yc}(s)$; контур коррекции по сигналам угла α_k отклонения корпуса от плоскости горизонта включающий датчик угловой скорости $\dot{\alpha}_k$ корпуса (ДУС) $W_{дус}(s)$, интегрирующий элемент K_3/s , следящий шаговый двигатель $K_{сшд}$; двухпозиционное реле – $W_p(s)$ на выходе которого коммутируются цепи с δ_1, δ_2 - безразмерными коэффициентами $0 < \delta_1 < 1, \delta_2 > 1$, характеризующими «глубину» корректирующего сигнала по отношению к возмущающему маятник ускорению.

Угол отклонения маятника $\alpha_m(s)$ в этом случае определяется выражением:

$$\alpha_m(s) = \frac{\left(a_x(s) \left(ml - K_0 K_1 \delta(\alpha_p) W_A(s) \right) \right) W_M(s)}{1 - g K_0 K_1 \delta(\alpha_p) W_A(s) W_M(s)}, \quad (3)$$

где:

$$\alpha_p = (\alpha_m(s) + \alpha_k(s) - \frac{K_{сшд} K_3}{s} W_{дус}(s) \dot{\alpha}_k(s)) W_{ду}(s) W_{ус}(s)$$

сигнал, подаваемый на реле.

При достижении установленного допустимого значения отклонения маятника α_p реле меняет «глубину» корректирующего сигнала.

На рисунке 5 представлен результат моделирования такого маятника при появлении скачка ускорения в $1g$ на 1-ой секунде и возникновении угла α_k отклонения его корпуса и равного 45° на 3-ей секунде. Параметры маятника и акселерометра приняты такими же, как в варианте без релейного управления. Коэффициенты уровней корректирующего сигнала выбраны равными $\delta_1 = 0.9$, $\delta_2 = 1.1$.

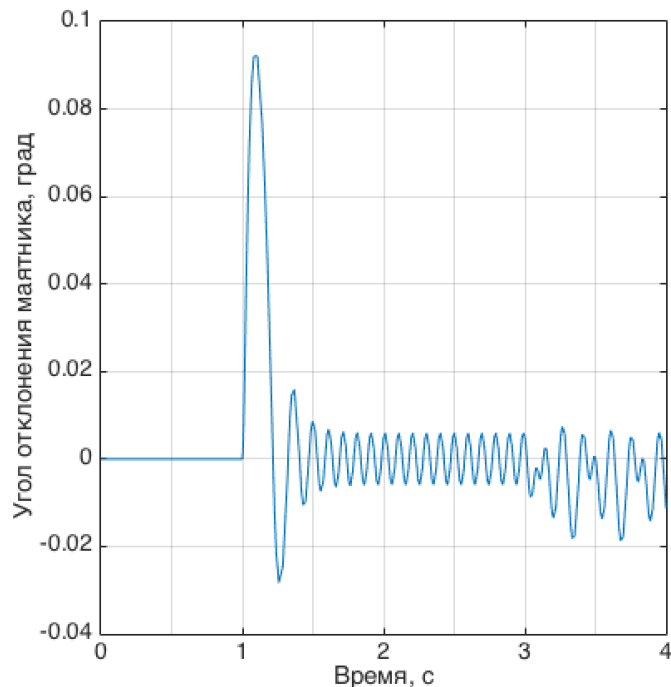


Рис. 5 – Выходной сигнал маятника с релейным управлением

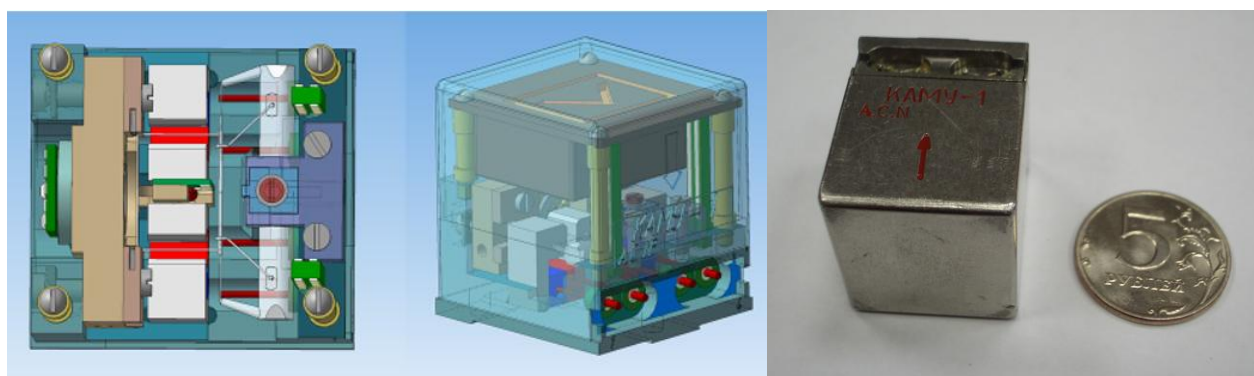
Из рисунка следует, что в момент появления ускорения на 1й секунде на уровне $1g$ происходит скачок отклонения маятника до величины $\pm 0.1^\circ$; затем устанавливаются колебания с амплитудой $\pm 0.01^\circ$; на 3й секунде при появлении угла отклонения $\alpha_k = 45^\circ$ амплитуда колебаний маятника устанавливаются на уровне $\pm 0.02^\circ$.

Проведен анализ влияния реальных характеристик корректирующих акселерометров на точностные показатели МПВ в соответствии с данными таблиц 1 и 2 для серийно выпускаемых кварцевых и микроэлектромеханических (МЭМС) акселерометров, а также разработанный в МАИ кварцевых маятниковых акселерометром КАМУ-1 (таблица 3), элементы которого представлены на рисунке 8.



а)

б)



в)

г)

д)

Рис. 8 – Конструкция КАМУ-1

а) модель кварцевого чувствительного элемента (ЧЭ); б) кварцевый ЧЭ в технологической оснастке; в) сборка основания с кварцевым ЧЭ; г) и д) внешний вид КАМУ-1

Таблица 1. Основные характеристики МЭМС-акселерометров

Тип	Число осей чувств. в.	$U_{пит},$ в	Интерфейс	Чувствительность	Полоса пропускания Гц	Диапазон измерения, g	Шум $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Гц}}$	Производитель	рабочий диапазон температур, °C	Тип корпуса, его размеры, мм
LIS3DSH	3	1,7...3,6	I2C/SPI	0,06 — 0,73 mg/dig	800	$\pm 2; 4; 6; 8; 16$	160	*	-40...105	LLGA 3,0x3,0x1,0
MMA8450Q	3	1,71...1,89	I2C	64 — 256 mg/dig	1,563—400	$\pm 2 / \pm 4 / \pm 8$	375	**	-40...85	QFN-16 3,0x3,0x1,0
ADXL362	3	1.6...3.5	SPI	1...4 mg/LSB	200	+/- 2/4/8	175	***	-40...85	—
BMA150(SMB380)	3	2.4...3.6	I2C/SPI	64 — 256 g/ LSB	25-1500	$\pm 2; \pm 4; \pm 8$	50	****	-40...85	LGA 12 3x3x0.9

* STMicroelectronics (Швейцария) ** Freescale (США) *** Analog devices(США) **** Bosch Sensortec (Германия)

Таблица 2. Основные характеристики кварцевых акселерометров

Тип	Число осей чувств. в.	U _{пит} , в	Интерфейс	Чувствительность	Полоса пропускания Гц	Диапазон измерения, g	Шум $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Гц}}$	Прозводитель	рабочий диапазон температур, °С	Тип корпуса, его размеры, мм
QA-750	1	$\pm 13 \dots \pm 18$	Аналог	$< 1 \mu\text{g}$	> 300	± 30	< 7 (0-10 Hz); 70 (10-500 Hz);	*	-55 ... +95	$\varnothing 25.65 \times 19.81 \text{мм}$
Mini Q	1	$\pm 12 \dots \pm 18$	Аналог	$1 \mu\text{g}$	200	± 20	—	*	0 ... 200	—
RBA500	1	$+14 \dots +16$	Частотный	$1 \mu\text{g}$	400	± 70	—	*	-55 ... +105	$\varnothing 17 \times 8.89 \text{мм}$
AI-Q-710	1	$\pm 13 \dots \pm 28$	Аналог	$1 \mu\text{g}$	300	± 30	< 7 (0-10 Hz); 70 (10-500 Hz);	**	-55 ... +95	$\varnothing 28.4 \times 21.65$
QFM-180	1	$\pm 12 \dots \pm 15$	Аналог	$10 \mu\text{g}$	300	± 20	4	***	-40 ... +180	$\varnothing 18 \times 15.2$
JGX-1	1	$\pm 12 \dots \pm 18$	Аналог	$5 \mu\text{g}$	800	$\pm 30, 50$	20-50	****	-40 ... +80	—
AK-15	1	$\pm 15 \dots \pm 0,75$	Аналог	$20 \cdot 10^{-5}$	—	± 10	30	*****	- 60 ... + 70	24x24x21
AK-6	1	$\pm 15 \dots \pm 0,75$	Аналог	$8 \cdot 10^{-5}$	—	± 10	—	***** *	- 60 ... + 70	24x24x21
BA-3	1	—	Аналог	$24 \cdot 10^{-5}$	1200	± 50	—	***** **	-55...+85	—

*Honeywell Aerospace (США) **InnaLabs (США) *** Jewell Instruments (США) **** GX (Китай) *****МИЭА (Россия)

*****ОАО "Серпуховский завод "Металлист" (Россия) *****Электрооптика (Россия)

Таблица 3 – Технические характеристики акселерометра

Наименование параметра	Характеристики, полученные при испытаниях и исследованиях
Диапазон измерений, g	± 5
Порог чувствительности, g	$2 \cdot 10^{-6}$
Нулевой сигнал, g	$3.77 \cdot 10^{-4}$
Смещение нуля, g	$3.75 \cdot 10^{-4}$
Вариация нулевого сигнала, g	$0.25 \cdot 10^{-5}$
Дрейф нулевого сигнала на неподвижном основании при установившейся рабочей температуре и напряжении питания, g, за время 10 мин за время 10 часов	$1 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-5}$
Температурный коэффициент смещения нулевого сигнала, g/°С при Т от +20°С до +75°С	$2.9 \cdot 10^{-6}$

Динамические характеристики:	
а) резонансный пик, не более	2
б) частота собственных колебаний недемпфированных колебаний, Гц, не менее	250
Нестабильность крутизны выходной характеристики, % от текущего значения выходного сигнала	0.1
Масса изделия, кг	0.06

На рисунке 9 представлена структурная схема имитационного моделирования одноосного МПВ в среде *Matlab – Simulink*.

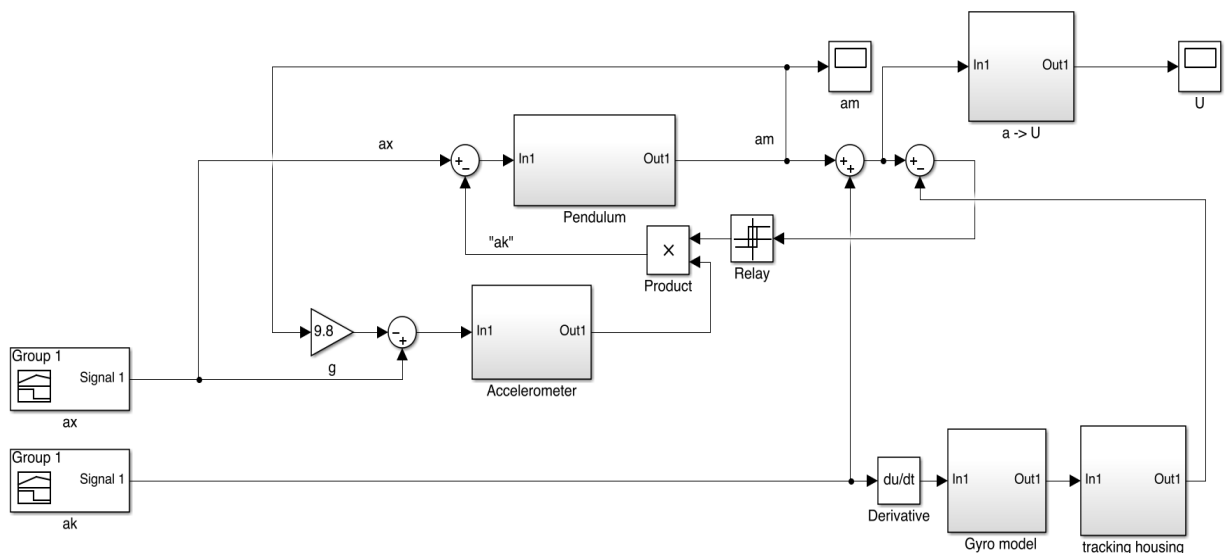


Рис. 9 – Схема имитационного моделирования

На рисунках 10 и 11 представлены результаты моделирования одного канала маятникового построителя вертикали в среде *Matlab – Simulink* с использованием коррекции от МЭМС и кварцевых акселерометров.

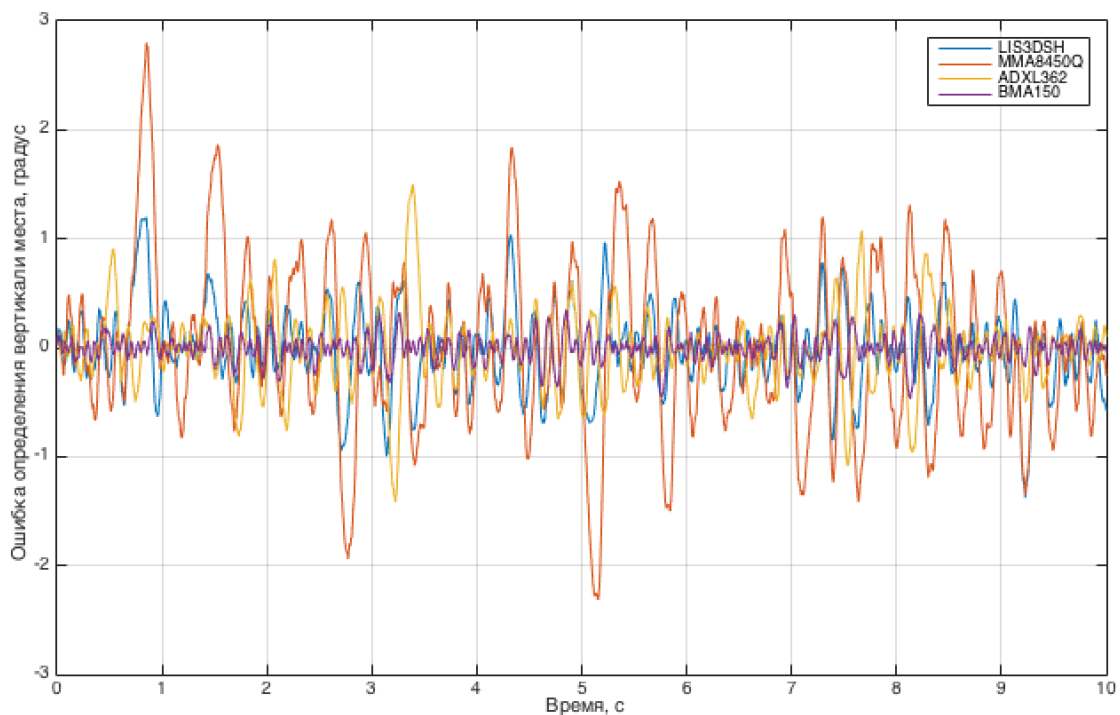


Рис. 10 – График шумового сигнала МПВ при коррекции от МЭМС акселерометров LIS3DSH, MMA8450Q, ADXL362, BMA150 (таблица 1)

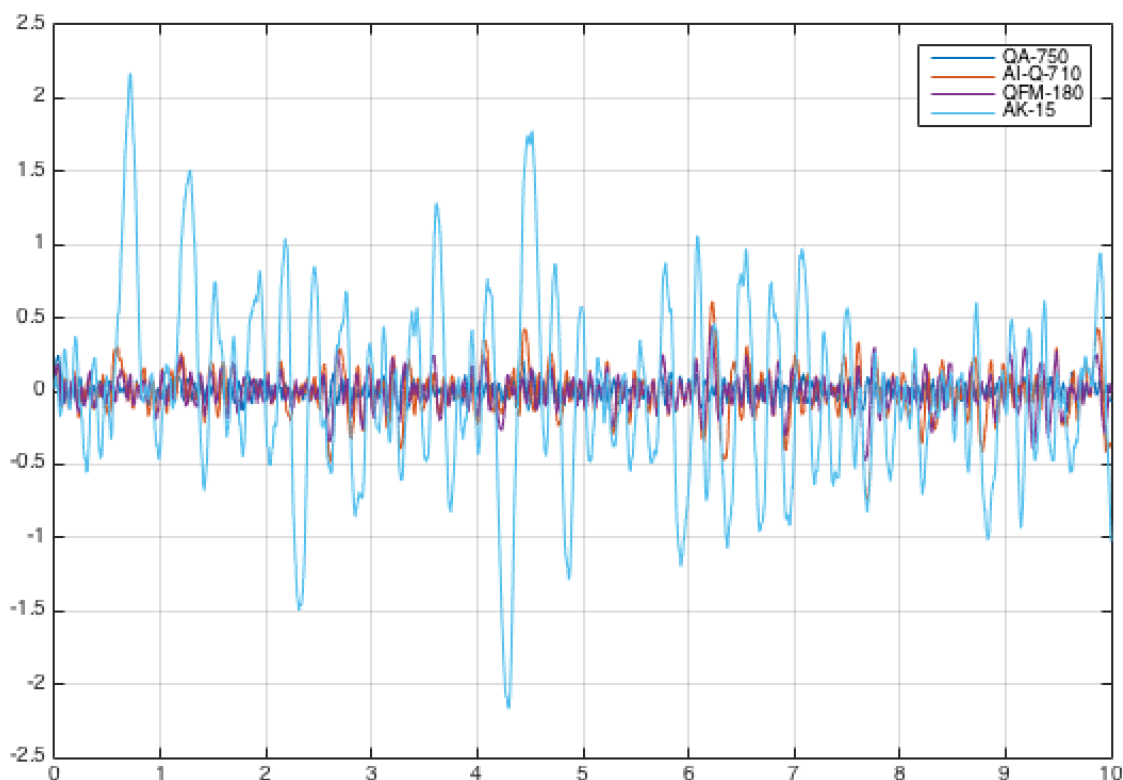


Рис. 11 – График шумового сигнала МПВ при коррекции от кварцевых акселерометров QA-750, AI-Q-710, QFM-180, АК-15 (таблица 2)

Погрешность определения вертикали места составила для МЭМС акселерометров до 3° , при горизонтальном ускорении $1g$, и отклонении корпуса прибора на 45° . Погрешность определения вертикали места составила для кварцевых акселерометров до 2.2° , при тех же начальных условиях.

На рисунке 12 представлены результаты моделирования одного канала маятникового построителя вертикали в среде *Matlab – Simulink* с учетом технических характеристик акселерометра КАМ.

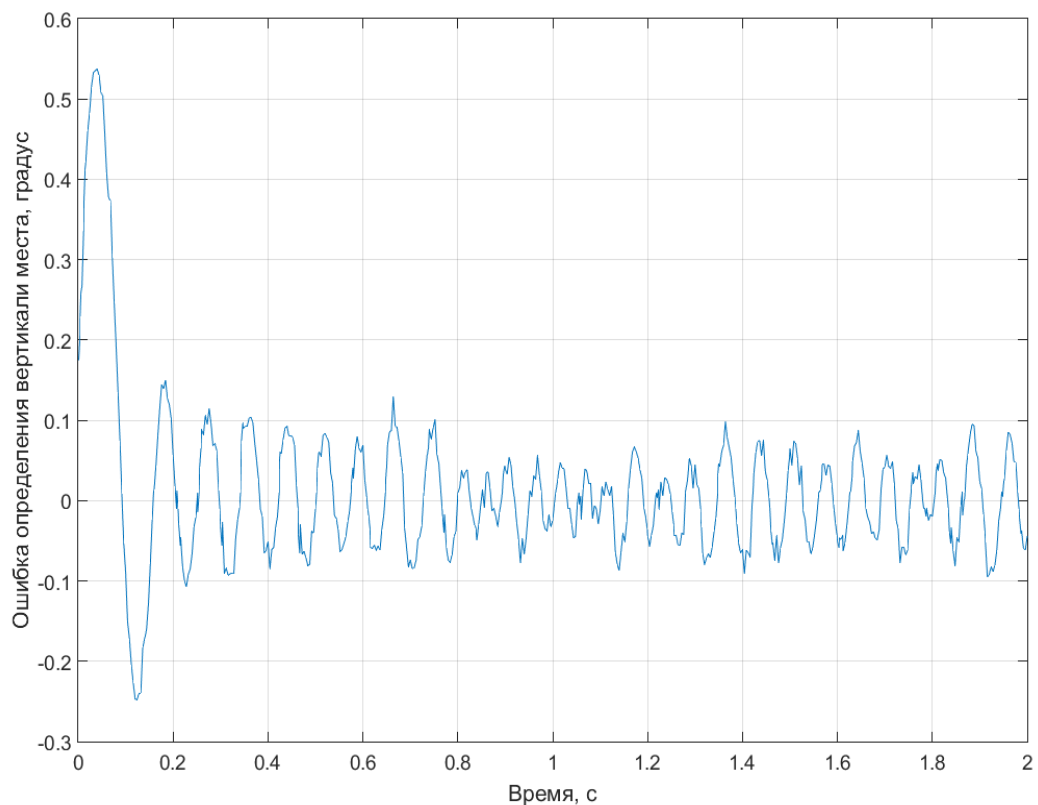


Рис. 12 – Погрешность определения вертикали места для КАМУ-1 в составе МПВ

Точность определения вертикали места составила 0.56° , при условии воздействия ускорения $1g$, и отклонении корпуса прибора на 45° .

Анализ проведенного исследования свидетельствует о перспективе создания МПВ на основе предложенной схемы. На основе предложенной схемы может быть реализован ряд дополнительных вариантов, учитывающих специфику ЛА и область их применения.

Представляет интерес реализация такой вертикали с функционально необходимыми элементами (маятник, акселерометр, ДУС) построенными на единой конструктивно-технологической основе, позволяющей заметно снизить массогабаритные характеристики и унифицировать элементы. Такая возможность появляется при использовании в качестве основного конструкционного материала кварцевого стекла [5,6].

Возможно применение маятникового построителя вертикали с релейным управлением в качестве элемента управления на борту ЛА в режиме горизонтирования следящей бортовой приборной аппаратуры, резервного авиагоризонта, в первую очередь для БПЛА, устройства коррекции БИНС на объектах разного назначения или в качестве самостоятельного формирования горизонтальных каналов ИНС. Рассмотренные концепции построения МПВ не являются единственно возможными, что открывает широкие перспективы для проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Библиографический список

1. Мельников В.Е., Мельникова Е.Н., Черноморский А.И., Гончаренко Г.Г. Датчики инерциальных систем. – М.: МАИ-Принт, 2011. – 354 с.

2. Мельников В.Е., Петрухин В.А. Маятниковая вертикаль для беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70656>
3. Мельникова Е.Н., Мельников В.Е. Маятниковый индикатор вертикали // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 1. С. 12-19.
4. Пронькин А. Н., Кузнецов И. М., Веремеенко К. К. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=23811>
5. Мельников В.Е. Электромеханические преобразователи на базе кварцевого стекла. – М.: Машиностроение, 1984. - 159 с.
6. Мельников В.Е. Основы расчета статических и динамических характеристик кварцевых акселерометров. - М.: Изд-во МАИ, 1982. - 51 с.
7. Петрухин В.А., Мельников В.Е. О возможности создания квазиравновозмущаемого маятникового построителя вертикали // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2016. Т. 17. № 8. С. 554-559.