УДК.621.391.14

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПО ИНФОРМАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА

© 2017 В.В. Алешкин¹, П.Н. Голованов², И.В. Сергушов²

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. ² АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», г. Саратов

Статья поступила в редакцию 15.03.2017

Приводятся результаты математического и полунатурного моделирования работы алгоритмов фильтрации сигналов микромеханических гироскопов и акселерометров инерциального измерительного блока. Сопоставляются спектры и погрешности оценивания параметров движения для нескольких вариантов алгоритмов с учётом математических моделей датчиков в условиях воздействия стационарных и нестационарных возмущений.

Ключевые слова: инерциальный модуль, фильтрация, сигнал, погрешность

При построении алгоритмов оценивания и минимизации составляющих случайных погрешностей инерциальных датчиков применяются схемы и алгоритмы фильтрации, различающиеся по уровню привлекаемой априорной информации о стохастических характеристиках ошибок измерений. Существенное распространение в навигационных задачах получил оптимальный алгоритм цифрового фильтра Калмана (ФК), применяемый для оценивания сигналов инерциальных датчиков при воздействии стационарных помех и возмущений [1, 2]. Особенностью ФК является то, что входные возмущения w(t) и ошибки измерения v(t) в ФК должны быть гаусовским белым шумом с нулевым математическим ожиданием. Векторы w(t) и v(t) должны быть статистически независимы и их взаимная корреляционная функция должна быть равна нулю. При эксплуатации инерциальных датчиков на измеренные полезные сигналы накладываются возмущения в виде комбинации шумов различной стохастической природы [3]. Эти возмущения обусловлены внешними возмущениями и внутренними источниками ошибок, вызванными конструктивными и технологическими особенностями измерителей

Для повышения точности оценивания сигналов необходимо точное задание статистических характеристик шумов динамической системы и измерений, математической модели системы. Рассматривается задача анализа погрешностей работы стационарного ФК, построенного на основе разных математических моделей датчиков, сравниваются результаты работы ФК и линейного фильтра низких частот (ФНЧ). Практическая значимость и научная новизна представляемой работы заключается в получении количественных значений погрешностей оценивания параметров движения с помощью ФК на основе различных вариантов математических моделей датчиков и фильтров.

Методика и последовательность проведения исследования. Рассматривалась динамическая система, построенная на основе передаточная функций чувствительного элемента (ЧЭ) датчика, и математических моделей, описывающих сигналы и шумы ЧЭ. Реализация математических моделей ФНЧ и ФК осуществлялась на основе стандартных библиотек программы MatLAB Simulink. Исследовалась эффективность работы ФК и ФНЧ при оценивании полезного сигнала с возмущениями в виде белого или цветного шума, а также натурных сигналов микромеханических гироскопов (ММГ) и акселерометров (ММА). Блок-схема программы моделирования в Simulink MatLAB приведена на рис. 1.





При математическом моделировании рассматривалась динамическая система [4]

. . .

...

$$x[n+1] = A \cdot x[x] + B \cdot u[n] + G \cdot w[n],$$

$$y_{\nu}[n] = C \cdot x[n] + D \cdot u[n] + H \cdot w[n] + \nu[n] \quad (1)$$

с известными входами динамической системы *и* и возмущениями по входам *w* и измерениям *v*, которые являются «белым» шумом со следующими характеристиками:

Алешкин Валерий Викторович, доктор технических наук, профессор. E-mail: aleshkinvv@yandex.ru

Сергушов Игорь Викторович, первый заместитель генерального директора – главный конструктор. E-mail: pilot@kbpa.ru

Голованов Павел Николаевич, ведущий инженерсистемотехник. E-mail: p.golovanov@kbpa.ru

$$M\{w\} = M\{v\} = 0, \ M\{w(t) \cdot w(\tau)^T\} = Q \cdot \delta(t - \tau)$$
$$M\{w(t) \cdot v(\tau)^T\} = R \cdot \delta(t - \tau), \ M\{v(t) \cdot w(\tau)^T\} = N \cdot \delta(t - \tau)$$
(2)

где *А* - матрица состояния; *В* – матрица управления; *G* – матрица ошибок; *С* – матрица измерений; *D* – матрица прямой связи; *H* – матрица шумов наблюдения; *R*, *Q*, *N* – матрицы ковариаций.

В этом случае фильтр Калмана описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \hat{x}[n+1] = A \cdot \hat{x}[n] + B \cdot u[n] + L \cdot (y_v - C \cdot \hat{x}[n] - D \cdot u[n]), \\ \begin{bmatrix} \hat{x}[n] \\ \hat{y}[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \cdot (I - F \cdot C) \\ I - F \cdot C \end{bmatrix} \cdot \hat{x}[n] + \begin{bmatrix} (I - C \cdot F) \cdot D & C \cdot F \\ -F \cdot D & F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u[n] \\ y_v[n] \end{bmatrix}$$
(3)

где матрица коэффициентов *L* и новая матрица коэффициентов обратных связей *F* определяется на основе решения матричного алгебраического уравнения Риккати. Обновленная матрица коэффициентов обратных связей F применяется для того, чтобы уточнить предсказание x[n] на основе измерения y[n]:

$$\hat{x}[n+1] = \hat{x}[n] + F \cdot \left(y_{\nu}[n] - C \cdot \hat{x}[n] - D \cdot u[n]\right)$$
(4)

где $\hat{x}[n+1]$ - оценка сигнала, I - единичная матрица, F- матрица коэффициентов обратной связи.

Математическая модель формирующего фильтра. При построении математической модели ФК применяется динамическая система, описываемая дифференциальным уравнением преобразования входного белого шума цифровым формирующим фильтром. Рассмотрим дифференциальное уравнение ФФ первого порядка [1]:

$$\dot{x}(t) + \mu \cdot x(t) = \sqrt{D_x \cdot \mu} \cdot w(t), \qquad (5)$$

на вход которого поступает белый шум w(t) единичной интенсивности μ с дисперсией D_x , на выходе образуется экспоненциально - коррелированный случайный процесс. Дифференциальное уравнение математической модели ФФ запишем в виде:

$$0,003183 \cdot \dot{x} + 1 \cdot x = 1,414 \cdot w(t) \tag{6}$$

Преобразовав уравнение (6) к дискретному виду получим выражение:

$$x_{1,n+1} = x_{1n} \cdot (1 - 314, 16 \cdot T) + 444.235 \cdot w \cdot T$$
⁽⁷⁾

где *T* – период квантования, равный 2е-05с, величина которого задавалась в соответствии с условиями числовой устойчивости этого и последующих рекуррентных уравнений ЧЭ.

График АЧХ формирующего фильтра (7) приведен на рис. 2. Из графика АЧХ ФФ видно, что полоса пропускания составляет 50,8 Гц.



Рис. 2. График АЧХ ФФ

Упрощенные математические модели MMA. Для учёта в уравнениях фильтра Калмана параметров акселерометра воспользуемся математической моделью MMA ADXL 203 [5], структурная схема которой приведена на рис. 3.



Рис. 3. Упрощенная математическая модель ММА маятникового типа: $W_{_{BM}}^{_{MMA}}$, $W_{_{PHY}}$ - передаточные функции ЧЭ ММА, демодулирующего фильтра и ФНЧ выходного каскада, K - коэффициент усиления

Запишем дифференциальное уравнение усеченной математической модели ММА:

$$8,374e - 10 \cdot \ddot{x} + 5,788e - 06 \cdot \dot{x} + 1 \cdot x = 0,011 \cdot U$$
(8)

В уравнении (8) не учтены члены с производными выше второго порядка на основании проверки

$$\begin{cases} x_{1,n+1} = x_{1n} + T \cdot x_{2n}, \\ x_{2n} = -1.1942e + 09 \cdot T \cdot x_{1n} + (1 - 1.0494e + 10 \cdot T) \cdot x_{2n} + T \cdot 1.3136e + 07 \cdot U_{1n} \end{cases}$$
(9)

Матрицы пространства состояний:

$$A_{_{MMa}}^{_{V9}} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ -1.1942e + 09 \cdot T & (1 - 1.0494e + 10 \cdot T) \end{bmatrix}.$$



Преобразовав уравнение (8) к дискретному виду получим выражения:

$$= x_{1n} + T \cdot x_{2n},$$

= -1.1942e + 09 \cdot T \cdot x_{1n} + (1 - 1.0494e + 10 \cdot T) \cdot x_{2n} + T \cdot 1.3136e + 07 \cdot U_{1n} (9)

 $B_{MMa}^{\phi_{HY}} = \begin{bmatrix} 0\\ T \cdot 1.313e + 07 \end{bmatrix}$ (10)

График АЧХ ММА без ФНЧ приведен на рис. 4.



Рис. 4. График АЧХ ЧЭ ММА

Дифференциальное уравнение усеченной математической модели ММА с учётом фильтра низких частот выходного каскада запишем в виде:

 $9.165e - 08 \cdot \ddot{x} + 0.003213 \cdot \dot{x} + 1x = 0.9983 \cdot U$ (11)

Преобразовав уравнение (11) к дискретному виду получим выражения:

$$\begin{cases} x_{1,n+1} = x_{1n} + T \cdot x_{2n}, \\ x_{2n} = -1.0911e + 07 \cdot T \cdot x_{1n} + (1 - 3.5057e + 04 \cdot T) \cdot x_{2n} + T \cdot 1.0893e + 07 \cdot U_{1n} \end{cases}$$
(12)

Матрицы пространства состояний:



Рис. 5. График АЧХММА с ФНЧ

Из рис.4, 5 видно, что полоса пропускания ЧЭ составляет 8,27е+03 Гц, с учетом ФНЧ она сужается до 50,1 Гц.

Упрощенная математическая модель ММГ. В качестве датчика угловой скорости рассматривался ММГ типа CRG20, построенный по RR-схеме вибрационного гироскопа. Упрошенную математическую модель ММГ представим в виде [6, 7]:



Рис. 6. Упрощенная математическая модель ММГ RR-типа:

где - ω_{γ} , ω_{α} - угловые частоты колебаний ИМ, Q_{γ} , Q_{α} - добротности, J_x , J_z - моменты инерции ротора, Ω - входная угловая скорость, M_B - момент привода инерционной массы, K_{AY} - коэффициент датчика угла, K_{AM} - коэффициент датчика момента, $\Omega_{u_{M}}$ - измеренное значение угловой скорости

Дифференциальное уравнение упрощенной $\ddot{x} + 0,6406e - 06 \cdot \dot{x} + 1,026e + 07 \cdot x = 1,905e + 06 \cdot U$ математической модели ЧЭ ММГ [8]: (14)

Преобразовав уравнение (14) к дискретному виду получим выражения:

$$\begin{cases} x_{1,n+1} = x_{1n} + T \cdot x_{2n}, \\ x_{2n} = 1,026e + 07 \cdot T \cdot x_{1n} + (1 - 0,6406e - 06 \cdot T) \cdot x_{2n} + T \cdot 1,905e + 06 \cdot U_{1n} \end{cases}$$
(15)

Матрицы пространства состояний:

$$A_{MM2}^{vs} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ -1,026e + 07 \cdot T & (1 - 0,6406e - 06 \cdot T) \end{bmatrix},$$

 $B_{_{\mathcal{MM2}}}^{_{\mathcal{Y9}}} = \begin{bmatrix} 0\\ T \cdot 1,905e + 06 \end{bmatrix}. \tag{16}$

График АЧХ ММГ без ФНЧ приведен на рис. 7.



Рис. 7. График АЧХ ММГ без ФНЧ

Дифференциальное уравнение усеченной $1,002 \cdot \ddot{x} + 26120 \cdot \dot{x} + 1,026e + 07 = 1,905e + 06 \cdot U$ математической модели ЧЭ ММГ с учётом фильтра низких частот выходного каскада: (17)

Преобразовав уравнение (17) к дискретному виду получим выражения:

$$\begin{cases} x_{1,n+1} = x_{1n} + T \cdot x_{2n}, \\ x_{2n} = -1.0240e + 07 \cdot T \cdot x_{1n} + (1 - 2.6067e + 04 \cdot T) \cdot x_{2n} + T \cdot 1.9012e + 06 \cdot U_{1n} \end{cases}$$
(18)

Матрицы пространства состояний:

$$A_{_{MM2}}^{\phi_{M4}} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ -1.0240e + 07 \cdot T & (1 - 2.6067e + 04 \cdot T) \end{bmatrix}$$



$$\int_{MMZ} \left[T \cdot 1.9012e + 06 \right].$$
(19)

График АЧХ ММГ с ФНЧ приведен на рис. 8.



,

Рис. 8. График АЧХ ММГ с ФНЧ

Из графиков 7, 8 видно, что полоса пропускания математической модели ММГ без ФНЧ составляет 791 Гц, с ФНЧ - 55,8 Гц.

Результаты анализа погрешностей при стационарных и нестационарных возмущениях. Для анализа погрешностей использовались натурные записи сигналов ММГ марки CRG20 (ф. SiliconSensing) и ММА марки ADXL203 (ф. AnalogDevices) на неподвижном основании с возможностью наложения полезной составляющей различного вида. Результаты сравнивались с оценками этих сигналов при наложении белого шума в качестве порождающего и измерительного шумов. Получено, что применение стационарного линейного фильтра низких частот с полосой пропускания 50 Гц на основе ФНЧ первого порядка позволяет снизить шум датчика до 4.0244е-04 ед. (СКО) при входном шуме 0.0010 ед. (СКО). В результате анализа погрешностей ФК на основе математических моделей ЧЭ датчиков (ММГ и ММА) получено, что снижение шумов практически не происходит. При работе ФК на основе математической модели ЧЭ ММА (по формуле 12) шум снижен до 9.9677е-04 м/с² (СКО), а при ФК на основе математической модели ЧЭ ММГ (по формуле 18) до 9.9671е-04 град/с (СКО).

Для определения влияния ФК на основе ЧЭ ММА (ЧЭ ММГ) построен амплитудный спектр ошибки оценивания (рис. 9), вычисленный как разность входного белого шума и выходного сигнала после ФК на основе ЧЭ ММА.



Рис. 9. График амплитудного спектра ошибки оценивания при обработке в ФК на основе модели ЧЭ ММА и ЧЭ ММГ, $[Y(f)] = [m/c^2 \Gamma \mu]$

Из графика видно, что амплитудные спектры сигналов после обработки в ФК с учётом математических моделей ЧЭ ММА и ММГ соответствует идеальным АЧХ, приведенным на рис. 3 и 6. В результате анализа погрешностей ФК на основе математической модели ЧЭ ММА (ЧЭ ММГ) с учётом фильтра низких частот получено (уравнения 14 и 20), что при наличии белого шума с СКО 0.0010 м/с² (град/с) ошибка снижена до 6.5225е-04 м/с² (СКО) и 6.4969е-04 град/с (СКО) для ММА и ММГ соответственно.



Рис. 10. График амплитудного спектра ошибки оценивания при обработке в ФК на основе модели ММА с ФНЧ сигнала белого шума, $[Y(f)] = [M/c^2 \Gamma \mu]$

Из графиков амплитудных спектров (рис. 10) видно, что полоса пропускания ФК для модели ФФ, модели ММА и модели ММГ практически соответствует идеальной АЧХ (рис.4 и 7). На графике видно, что в полосе пропускания сигналы амплитудного спектра ФК идентичны. После частоты 50 Гц наблюдается спад АЧХ. В результате анализа погрешностей ФК первого порядка на основе математической модели ФФ (уравнение 7) для белого шума получено, что при оценивании сигнала белого шума с СКО 0.0010 м/с² (град/с) ошибка снижена до 6.6766е-04 м/с². На графике амплитудного спектра (рис. 11) видно, что полоса пропускания ФК для модели формирующего фильтра составляет 50 Гц. В табл. 1 сведены результаты вычислений статистических характеристик моделирования ФК на основе различных вариантов математических моделей.



Рис. 11. График амплитудного спектра ошибки оценивания при обработке в ФК на основе ФФ, $[Y(f)] = [m/c^2 \Gamma u]$

	Статистические характеристики сигн				
Статистическая характеристика	ла				
сигнала	$CVO rat/a^2$	$CVO w/a^2$	$CVO w/c^2$	Дисперсия,	Матем.
	CKO, M/C	M^2/C^4	ожидание, м/с ²		
Параметры входного белого шума	0.0010	1.0009e-06	2.1592e-06		
Фильтр низких частот	4.0244e-04	1.6196e-07	-3.7106e-0		
ФК для математической модели	9.96770-04	9 93550-07	1.64090-05		
ММА без ФНЧ (2 порядка)	9.90776-04	9.93336-07	1.04096-03		
ФК для математической модели	9 96710-04	9 93/30-07	1 6/090-05		
ММГ без ФНЧ (2 порядка)	5.50716-04	7.75456-07	1.04098-03		
ФК для математической модели	6 5225e-04	4 2542e-07	-3 6302e-06		
ММА с ФНЧ (2 порядка)	0.52250 04	4.23420 07	-5.05026-00		
ФК для математической модели	6.4969e-04	4 2209e-07	-3 6306e-06		
ММГ с ФНЧ (2 порядка)	0.47076-04	4.22070-07	5.05000-00		
ФК для ФФ (1 порядка)	6.6766e-04	4.4577e-07	-3.6283e-0		

Таблица 1. Результаты вычислений статистических характеристик моделирования

Из таблицы 1 видно, что при подавлении белого шума наибольшую эффективность показал линейный ФНЧ. Применение ФК на основе математической модели ЧЭ без учёта ФНЧ не приводит к снижению шумов. Оценим эффективность применения ФК при обработке натурного сигнала ММА ADXL203 и ММГ CRG20 в статическом режиме работы на неподвижном основании. Результаты работы при оценке в ФК сигналов ММА приведены в табл. 2. Результаты моделирования при оценке в ФК сигналов ММГ приведены в табл. 3. Из табл. 2, 3 следует, что применение ФК для ФФ и ФК для математической модели ММА (ММГ) с ФНЧ позволяют практически с одинаковой эффективностью снизить ошибку оценивания полезного сигнала. На рис. 12 показаны амплитудные спектры сигналов ММА и оценок в ФК. На рис. 13 показаны амплитудные спектры сигналов ММГ и оценок в ФК.

Таблица 2. Результаты работы при оценке в ФК сигналов ММА

C	Статистические характеристики сигнала		
статистическая характеристика			
сигнала	СКО,	Дисперсия,	Матем.
	M/C^2	M^2/C^4	ожидание, м/с ²
Параметры входного шума ММА	0.0063	3.9233e-05	1.2510e-04
Фильтр низких частот	0.0055	3.0774e-05	-3.9078e-05
ФК для математической модели MMA без ФНЧ	0.0063	3.9230e-05	1.2510e-04
ФК для математической модели MMA с ФНЧ	0.0050	2.5246e-05	-3.8926e-05
ФК для ФФ (1 порядка)	0.0047	2.2232e-05	1.2441e-04

Таблица 3	. Результаты	моделирования	при оценке в	ΦК	сигналов	ΜМΓ
-----------	--------------	---------------	--------------	----	----------	-----

	Статистические характеристики сиг-			
Статистическая характеристика	нала			
сигнала	$CVO m/s^2$	Дисперсия,	Матем.	
	$CKO, M/C^{-}$	M^2/C^4	ожидание, м/с ²	
Параметры входного шума ММГ	0.5127	0.2629	-0.0654	
Фильтр низких частот	0.4327	0.1873	-0.0652	
ФК для математической модели ММГ без ФНЧ	0.5127	0.2629	-0.0654	
ФК для математической модели ММГ с ФНЧ	0.3451	0.1191	-0.0651	
ФК для ФФ (1 порядка)	0.3535	0.1250	-0.0652	



Рис. 12. График амплитудного спектра ошибки оценивания при обработке в ФК сигнала ММА, $[Y(f)] = [m/c^2 \Gamma u]$



Рис.13. График амплитудного спектра ошибки оценивания при обработке в ФК сигнала ММА, $[Y(f)] = [M/c^2 \Gamma \mu]$

При обработке в ФК на основе математической модели ММА и ММГ с учетом ФНЧ на амплитудном спектре наблюдается снижение помехи после частоты 50 Гц. Оценим эффективность работы ФК при обработке нестационарного сигнала в виде синусоиды частотой 30 Гц с наложенным белым шумом. Применим интегральную оценку погрешностей определения полезной составляющей сигнала за время 60 с. Результаты моделирования нестационарного приведены в табл. 4. Из табл. 4 следует, что при обработке нестационарного сигнала в ФК для математических моделей ММГ и ММА с ФНЧ интегральные значения ошибки оценивания полезного сигнала (синусоиды) на порядок меньше, чем другие варианты алгоритмов.

Статистическая характеристика сигнала	СКО шума, ед/с	Интегральная оценка ошиб-
	1 00970 07	1 99100 06
параметры входного шума	1.00836-03	1.00190-00
Фильтр низких частот	4.0244e-04	1.3246e-06
ФК для математической модели ММГ без ФНЧ (2 порядка)	1.0083e-03	1.8819e-06
ФК для математической модели ММГ без ФНЧ (2 порядка)	9.4502e-04	1.6680e-06
ФК для математической модели ММГ с ФНЧ (2 порядка)	6.4592e-04	1.2677e-07
ФК для математической модели MMA с ФНЧ (2 порядка)	6.4293e-04	1.2052e-07
ФК для ФФ (1 порядка)	6.6520e-04	1.6105e-06

Таблица 4. Результаты нестационарного моделирования

Выводы:

1. При построении алгоритмов оценивания полезных составляющих сигналов на фоне шумов MMA ADXL203 и MMГ CRG20 нецелесообразно учитывать математические модели датчиков выше второго порядка.

2. При обработке сигналов датчиков на неподвижном основании наибольшую эффективность, в смысле снижения СКО погрешности, показал ФК на основе формирующего фильтра первого порядка и штатный ФНЧ ММА. При обработке натурных сигналов датчиков этот эффект усилился.

3. При моделировании обработки сигналов датчиков на подвижном основании интегральные значения ошибок оценивания полезной составляющей сигнала в ФК на основе математической модели датчиков с учётом ФНЧ за 60 с. на порядок меньше, чем дают другие рассмотренные варианты алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Располов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
- Степанов, О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. 509 с.

- Голованов П.Н. Исследование влияния погрешностей датчиков на точность работы малогабаритной бесплатформенной инерциальной навигационной системы для систем управления летательных аппаратов / П.Н. Голованов, А.Н. Попов, И.В. Сергушов // Проблемы управления, передачи и обработки информации: сб. тр. IV Междунар. науч. конф., сент. 2015 г. – Саратов, СГТУ, 2015. С.107-112.
- Kalman filterdesign, Kalman estimator (техническая справка MatLAB) [Электронный ресурс] / MathWorks.
 Режим доступа: <u>https://www.mathworks.com</u> /<u>help/dsp/ref/</u> almanfilter.html?searchHighlight=Kalman %20Filter&s_tid=doc_srchtitle (дата обращения: 08.02.2017).
- Прецизионный двухосевой акселерометр ADXL203 [Электронный ресурс] / AnalogDevice. – Режим доступа: http://www.analog.com/ru/products/memsaccelerometers/adxl203.html (дата обращения: 15.05.2016).
- Моисеев, Н.В. Влияние линейных вибраций, ударов и акустических помех на характеристики микромеханического гироскопа ММГ-ЭП1 // Н.В. Моисеев, Я.А. Некрасов, Я.В. Беляев // Мат-лы XXIX конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Остарякова. – СПб, 2014. С. -19.
- Моисеев, Н.В. Микромеханический гироскоп компенсационного типа с расширенным диапазоном измерения: дис. к.т.н.. – СПб., 2015. 123 с.
- Тетерин, Д.П. Методы моделирования линейных стационарных элементов систем управления летательных аппаратов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 4, № 1 (42). С. 65-71.

ASSESSMENT THE ERRORS OF DETERMINATION THE MOVEMENT PARAMETERS ON INFORMATION OF THE INERTIAL MEASUREMENT UNIT

© 2017 V.V. Aleshkin¹, P.N. Golovanov², I.V. Sergushov²

¹ Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin ² JSC "Design Bureau of Industrial Automation", Saratov

Results of mathematical and semi-natural model operation of work of algorithms filtration signals of micromechanical gyroscopes and accelerometers of inertial measurement unit are given. Ranges and errors of parameter estimation of movement for several options of algorithms taking into account the mathematical models of sensors in the conditions of impact of stationary and non-stationary disturbances are compared.

Key words: inertial module, filtration, signal, error

Valeriy Aleshkin, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: aleshkinvv@yandex.ru Pavel Golovanov, Leading Systems Engineer. E-mail: p.golovanov@kbpa.ru

Igor Sergushev, First Deputy General Director – Chief

Designer. E-mail: pilot@kbpa.ru