

УДК 681.514

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ СЛУЧАЙНОЙ СРЕДЫ

Жидкова Н.В., Волков В.Л.

Арзамасский политехнический институт – филиал Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Арзамас, e-mail: vipvly@bk.ru

Рассмотрено построение алгоритма комплексной обработки информации для микроэлектромеханической системы (МЭМС), обеспечивающего высокую динамическую точность. Для достижения высокой точности применены перекрестные связи источников информации и использован принцип инвариантности измеряемых параметров по отношению к помехам. Схема комплексной обработки информации имеет радиодальномер и МЭМС для измерения скорости. Ослабление помех выполняется в оптимальной форме на основе применения фильтра Калмана. Разработана математическая модель объекта и процесса наблюдения цели в векторно-матричной форме. Разработана методика компьютерного эксперимента для получения оценок эффективности комплексной системы в условиях помех. Получены результаты среднего квадрата ошибки (СКО) при моделировании комплексной системы в условиях реальной среды. Прикладные результаты исследования состоят в применении предложенной методики построения алгоритма в системах определения пространственного положения маневренных подвижных объектов в широком диапазоне сигналов и помех. Новизна исследований состоит в обеспечении эффективности комплексной системы обработки информации в условиях случайной среды. Предложенные алгоритмы комплексной обработки информации при численном координат маневренного объекта позволяют повысить точность измерительной системы.

Ключевые слова: МЭМС, инвариантность, динамическая точность, средний квадрат ошибки, моделирование, эффективность

PERFORMANCE EFFECTIVENESS OF COMPLEX MEASURING SYSTEM IN RANDOM ENVIRONMENT

Zhidkova N.V., Volkov V.L.

*Arzamassky polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university
n.a. R.E. Alexeev, Arzamas, e-mail: vipvly@bk.ru*

The article deals with algorithm development of complex information processing for microelectromechanical system (MEMS), which provides high dynamic precision. To get high precision, cross-connection of information source is applied and invariance of measured variables is used. Scheme of complex information processing has radio range finder and MEMS to measure speed. Interference reduction is done in optimum format by using Kalman filter. Mathematical model of object and that of target observation process in vector-matrix form are developed. Method of computer experiment is developed to estimate performance effectiveness of complex system against jamming. Results of average squared error (ASE) when modeling complex system in actual environment are received. Applied results of investigation involve applying the offered approach of algorithm development in systems of attitude determination of movable mobile units in a wide range of signals and interferences. Novelty of research involves ensuring effectiveness of complex information processing system in random environment. The offered algorithms of complex information processing when calculating coordinates of mobile unit allow to improve accuracy of measuring system.

Keywords: MEMS, invariance, dynamic accuracy, average square of the mistake, modeling, efficiency

Технологии изготовления МЭМС позволяют производить достаточно точные миниатюрные датчики для измерения механических величин мобильных объектов управления (роботов, беспилотных управляемых аппаратов и т.п.). На практике сигналы датчиков искажаются помехами, что дает значительный уровень погрешности в измерениях. В связи с этим вопросы обеспечения точности измерительных систем при их работе в условиях реальной среды представляются одними из важнейших. Точность информационного обеспечения во многом определяет возможности реализации эффективного управления подвижными объектами. Для ослабления помех необходимо применять дополнительные меры преобразования и обработки сигналов.

В литературе активно обсуждаются вопросы разработки и исследования МЭМС для измерения механических величин [1, 3–6, 8, 9, 10–12], в том числе в условиях случайных измеряемых физических процессов и при воздействии помех. С этой целью уже разработаны технологии оптимальной обработки сигналов, способные функционировать в условиях случайной среды [6, 8, 11, 13, 14]. Обеспечению статической и динамической точности МЭМС посвящено множество статей. В статьях [4, 9] для различных МЭМС были сформулированы требования к параметрам корректирующего устройства (КУ) типа ПИД регулятора из условия обеспечения минимальных значений динамических ошибок.

Производится учет условий реальной среды, предполагающей случайные отклонения измеряемых механических величин от стационарных значений и воздействие случайных помех при измерениях. При синтезе стохастических фильтров обычно помехи считают в виде винеровского процесса [13]. Часто измерительные шумы также рассматривают широкополосными случайными вибрациями (ШСВ), имеющими большое сходство с белыми шумами. Кроме того, при измерении механических величин выделяют режим медленно и быстро меняющихся процессов (то и другое свойственно динамическим объектам управления). При этих условиях в статье [6] отмечалась эффективность применения традиционного калмановского алгоритма фильтрации для оценивания полезных процессов в МЭМС широко применения (акселерометрах и датчиков угловых скоростей – ДУС).

В статье [11] для измерения продольного и вертикального ускорения автомобиля при эксплуатационных испытаниях использовался акселерометр с фильтром Калмана, причем мощность помех, искажающих информацию, считалась достаточно малой.

В продолжение исследований применения фильтра Калмана в измерительных системах в статье [8] представлен алгоритм получения оптимальных оценок при помехах в виде ШСВ. В статье были определены условия эффективности микроэлектромеханической системы – микрогирискапа. Экспериментальное исследование проводилось на основе программного обеспечения *Matlab* с использованием опубликованных ранее алгоритмов моделирования МЭМС ДУС со случайными сигналами [5].

Вышла в свет еще одна статья, касающаяся применения МЭМС в комплексной системе обработки информации в условиях измерительных шумов [7]. В статье сформулированы требования к параметрам МЭМС с перекрестными связями на основе критерия точности при использовании принципа инвариантности. Было проведено исследование эффективности работы комплексной МЭМС в условиях возмущенной среды (при воздействии интенсивных помех) и даны рекомендации по выбору субоптимального алгоритма фильтрации. Рассматриваемая в статье математическая модель комплексной МЭМС адекватно отражает реальную систему измерения дальности и скорости подвижного летательного аппарата. Полученные в статье результаты исследования по влиянию помех на динамическую точность комплексной системы позволяют выполнить достаточно эффективную фильтрацию и получить приемле-

мые среднеквадратические ошибки (СКО) оценок дальности и скорости.

Постановка задачи

Рассмотренный в статье [7] алгоритм комплексной обработки информации в МЭМС является всего лишь субоптимальным и не дает минимально возможных СКО. Интересным является применение традиционного алгоритма Калмана для комплексной обработки информации при оценивании скорости и дальности подвижного объекта относительно цели. В этом случае следует ожидать достижения минимальных СКО. В данной статье ставится задача разработки математической модели подвижного объекта и процесса наблюдения за целью в векторно-матричной форме, подходящей для проектирования фильтра Калмана. Все исходные данные, принятые в статье [7], при этом остаются действующими.

При исследовании используется гипотеза о некоррелированности шумов с измеряемыми процессами. Все процессы предполагаются стационарными, эргодическими с нормальными законами распределения. В фазовый вектор фильтра Калмана кроме переменных состояния подвижного объекта придется включить еще и переменные для случайных составляющих измеряемого процесса и шумовых процессов. Задачей исследования фильтра Калмана в данном случае является определение предельной ошибки при различных соотношениях мощности сигнала к мощности помех. Экспериментальное исследование измерительной системы проводится так же, как и в работе [7], на основе программного обеспечения *Matlab*.

Применение фильтрации Калмана для перекрестной схемы обработки сигналов датчиков сопряжено с необходимостью выделения объекта наблюдения и каналов измерения в традиционном виде (рис. 1).

На схеме обозначено U – вектор входных сигналов (в данном случае это ускорение, получаемое с микроакселерометра и дальность, получаемая с радиодальномера); N – вектор измерительных шумов, присутствующих измерителю скорости и измерителю дальности (цветные шумы); H – вектор выходных сигналов объекта наблюдения, т.е. скорости подвижного объекта и дальности цели; Y – вектор измерений скорости и дальности; He – вектор выходных сигналов фильтра.

Математическая модель комплексной системы

Построение математической модели объекта наблюдения производится в векторно-матричной форме. На начальном

этапе используется традиционная схема комплексной обработки информации включающая в себя радиодальномер и МЭМС для измерения скорости [7] измерителей с перекрестными связями, (рис. 2).

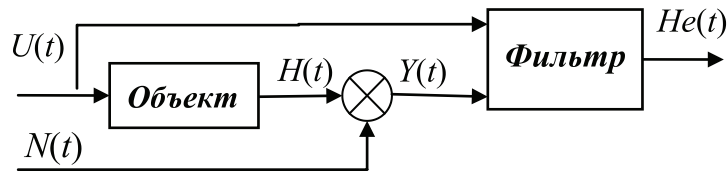


Рис. 1. Структурная схема комплексной обработки информации

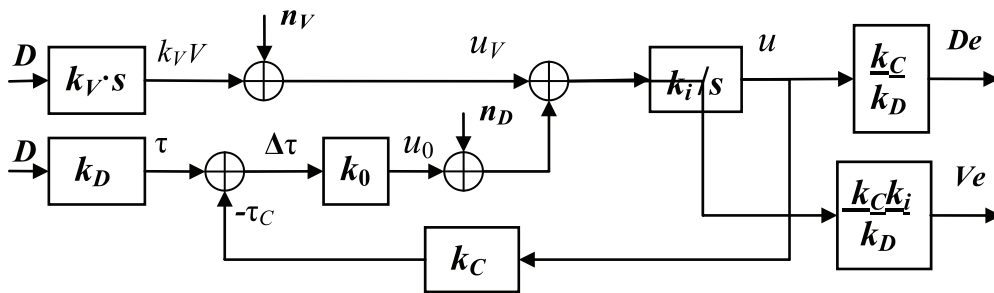


Рис. 2. Структурная схема комплексной обработки информации

На схеме обозначено: D – расстояние от подвижного объекта до цели; V – скорость подвижного объекта относительно цели; n_D – флюктуационная помеха измерителя дальности; n_V – погрешность измерителя скорости в виде цветного шума; De , Ve – оценки расстояния и скорости; k_V , k_D – коэффициенты пропорциональности соответственно измерителя скорости и дальности; k_i – коэффициент интегратора; k_0 – коэффициент усиления прямой цепи схемы слежения; k_C – коэффициент обратной связи.

Представим схему преобразования сигналов в объекте наблюдения (рис. 2) в более подробном виде (рис. 3). На рис. 3 схема *Obj1*, обведенная пунктиром, включает объект (рис. 1) и формирователь измерений. Схема содержит: входной детерминированно-стохастический процесс $D(t)$, состоящий из детерминированной составляющей $m_D(t)$ и случайной составляющей $g(t)$; схему преобразования для входного сигнала скорости – $W_A(s)$, формирующий фильтр – $W_G(s)$ для сигнала $g(t)$ и преобразователь П1. Для формирования измерений $y_V(t)$, $y_D(t)$ используется два сумматора.

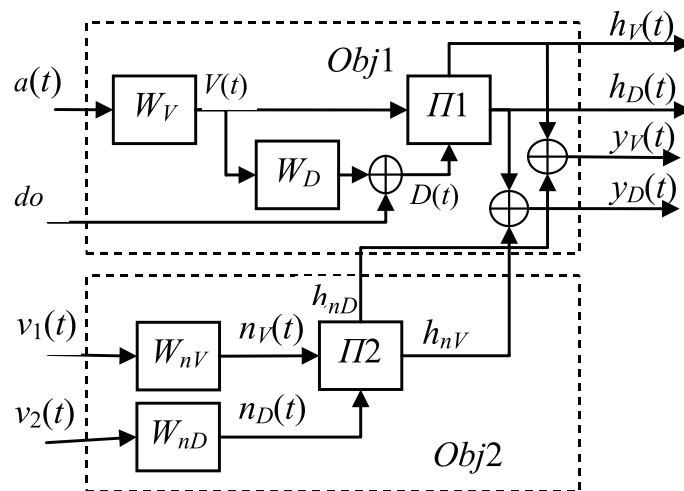


Рис. 3. Структурная схема объекта наблюдения

Объект *Obj1* имеет два входа: a – сигнал ускорения, измеряемый микроакселерометром; do – начальное расстояние до цели и четыре выхода: $h_v(t)$ – скорость подвижного объекта; $h_D(t)$ – дальность до цели; $y_v(t)$ – измерение скорости; $y_D(t)$ – измерение дальности.

Анализ схем рис. 2 и 3 дает возможность определить уравнения преобразования объекта по выходам. Ускорение подвижного объекта $a(t)$ определяет связанные с ним параметры движения – скорость и расстояние. Ускорение в данной задаче имеет некоторую постоянную составляющую – ao . Скорость движения объекта наблюдения в направлении цели связана с ускорением интегральным соотношением, расстояние определяется скоростью и начальной дальностью. Соответствующие дифференциальные уравнения и уравнение выхода имеют вид

$$\begin{cases} X'_1 = X_2, \\ X'_2 = a, \\ D = do - X_1, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} h_v = \frac{u \cdot s}{k_i} \frac{k_c k_i}{k_D} = \frac{k_c k_v k_i}{k_D} X_2 - \frac{k_c}{k_D T} X_3 + k_c k_i k_0 D, \\ h_D = u k_c / k_D = k_c / k_D (do - X_3). \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, математическая модель объекта *Obj1* определяется уравнениями

$$\begin{cases} X'_1 = X_2, \\ X'_2 = a, \\ X'_3 = -X_3/T + k_i k_v X_2 + k_i k_0 k_D (do - X_1), \\ h_v = X_2 k_c k_v k_i / k_D - X_3 k_c / (k_D T) + k_c k_i k_0 (do - X_1), \\ h_D = k_c / k_D (do - X_3). \end{cases} \quad (4)$$

Для цветных шумов $n_v(t)$, $n_D(t)$, присутствующих на схеме рис. 3, необходимо также сделать представление их математических моделей в пространстве состояний. Схема преобразования формирующих шумов в выходные сигналы в виде приведенных к измерениям помех: $h_{nv}(t)$, $h_{nD}(t)$ на рис. 3 обозначена как *Obj2*. Так как измерительные шумы по скорости и дальности являются цветными, то для них требуются свои схемы формирования: W_{nv} , W_{nD} . Так же, как и в *Obj1*, требуется рассмотреть перекрестное преобразование шумов с помощью преобразователя П2. Для *Obj2* формирующие шумы v_2 , v_3 составляют вектор входа, а результаты: $h_{nv}(t)$, $h_{nD}(t)$ – вектор вы-

хода. Исходные данные по характеристикам помех: $n_v(t)$, $n_D(t)$ представлены в материалах статьи [7] – это функции: $S_{nD}(\omega) = \sigma_{nD}^2 \omega^2 / (\omega^2 + \alpha_{nD}^2)$; $S_{nv}(\omega) = \sigma_{nv}^2 / (\omega^2 + \alpha_{nv}^2)$, где обозначено соответственно для помех $n_v(t)$, $n_D(t)$: S_{nv} , S_{nD} – спектральные функции; σ_{nv} , σ_{nD} – среднеквадратические отклонения; α_{nv} , α_{nD} – постоянные, характеризующие автокорреляцию.

где в качестве компонент вектора состояния X обозначено: X_1 – интеграл от скорости (приращение расстояния); $X_2 = V$ – скорость; D – расстояние.

Функции преобразования П1 рассматриваются на основе схемы рис. 2, где показано перекрестное преобразование скорости V и дальности D в сигнал u . Преобразование осуществляется с помощью следующего дифференциального уравнения (в переменных состояния $u = X_3$).

$$\{X'_3 = -X_3/T + k_i k_v X_2 + k_i k_0 k_D D, \quad (2)$$

где T – постоянная времени (T рассчитана в статье [7] и составляет

$$T = (k_i \cdot k_0 \cdot k_c)^{-1},$$

где k_i , k_0 , k_c – коэффициенты схемы рис. 2).

Выходные сигналы h_v и h_D , согласно схеме рис. 2 и с учетом (2), вычисляются в виде

(2), (3), (4), (7). Объединяя эти уравнения, получим систему

Передаточные функции формирующих фильтров W_{nv} , W_{nD} получаются на основе исходных данных соответствующих спектральных функций S_{nv} , S_{nD} . Проводя факторизацию спектральных функций, получим $W_{nD}(s) = \sigma_{nD} \cdot s / (s + \alpha_{nD})$; $W_{nv}(s) = \sigma_{nv} / (s + \alpha_{nv})$. Соответствующие дифференциальные

уравнения формирующих фильтров имеют вид

$$\begin{cases} X'_4 = -\alpha_{nV} X_4 + \sigma_{nV} v_1, \\ X'_5 = -\alpha_{nD} X_5 + v_2, \\ n_V = X_4, \quad n_D = \sigma_{nD} v_2 - \sigma_{nD} \alpha_{nD} X_5. \end{cases} \quad (5)$$

Функции преобразования П2 рассматриваются на основе схемы рис. 2, где показано перекрестное преобразование шумов $n_V(t)$, $n_D(t)$ в сигнал u . Преобразование осуществляется с помощью следующего дифференциального уравнения (в переменных состояния $u = X_6$).

$$\begin{cases} X'_6 = -1/T X_6 + k_i (X_4 + \sigma_{nD} v_2 - \sigma_{nD} \alpha_{nD} X_5), \\ h_{nV} = -X_6 k_C / (k_D T) + k_C k_i / k_D (X_4 + \sigma_{nD} v_2 - \sigma_{nD} \alpha_{nD} X_5), \\ h_{nD} = k_C / k_D X_6. \end{cases} \quad (6)$$

Измерения формируются в виде $y_V = h_V + h_{nV}$ – измерение скорости; $y_D = h_D + h_{nD}$ – измерение дальности:

$$\begin{cases} y_V = k_C k_i k_0 (do - X_1) + \frac{k_C k_V k_i}{k_D} X_2 - \frac{k_C}{k_D T} (X_3 + X_6) + \frac{k_C k_i}{k_D} (X_4 + \sigma_{nD} v_2 - \sigma_{nD} \alpha_{nD} X_5), \\ y_D = k_C / k_D (do - X_3 - X_6). \end{cases} \quad (7)$$

Математическая модель объекта для применения фильтра Калмана с целью комплексной обработки информации должна быть составлена в традиционной матричной форме: $X' = AX + Bu$, $Y = CX + Du$. Объединяя системы уравне-

ний (4)–(7), получим эту модель в виде большой системы из шести дифференциальных уравнений относительно четырех входов и четырех выходов. Из этой системы уже легко записать матрицы преобразований A , B , C , D :

$$A = [0, 1, 0, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0, 0; -ki*ko*kd, ki*kv, -1/T, 0, 0, 0; 0, 0, 0, -anv, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0, 0; -and, 0, 0, 0, ki, -ki*snd*and, -1/T];$$

$$B = [0, 0, 0, 0; 1, 0, 0, 0; 0, ki*ko*kd, 0, 0; 0, 0, snv, 0; 0, 0, 0, 1; 0, 0, 0, ki*snd];$$

$$C = [-kc*ko*ki, kc*kv*ki/kd, -kc/kd/T, 0, 0, 0; 0, 0, -kc/kd, 0, 0, 0;$$

$$-kc*ko*ki, kc*kv*ki/kd, -kc/kd/T, kc*ki/kd, -kc*ki*snd*and/kd, -kc/kd/T, 0, 0, -kc/kd, 0, 0, -kc/kd];$$

$$D = [0, kc*ko*ki, 0, 0; 0, kc/kd, 0, 0; 0, kc*ko*ki, 0, kc*ki*snd/kd; 0, kc/kd, 0, 0].$$

Пример моделирования комплексной измерительной системы

Моделирование комплексной системы выполняется в *Matlab*. Программа моделирования имеет управляющую часть и программу-функцию. Исходные данные по конкретным параметрам спектральных функций помех, измеряемому ускорению, начальной дальности задаются в управляющей программе. Их конкретные значения следующие: $Ta = 1e - 3$; $T = 26.4$; $snd = 1e2$; $snv = 1e2$; $and = 15$; $anv = 11$. Как следует из статьи [7], параметры k_V и k_C предварительно выбираются из условия инвариантности: $k_C = k_D$, $k_V = 1/k_P$, их конкретные значения в этом случае составляют: $ki = 0,0042$; $k_V = 237,8$; $kc = 3,0e-6$; $kd = 3e-6$; $ko = 3e + 6$. В управляющей программе использован вызов программы-функции, которая осуществляет расчет полной матричной моде-

ли, расчет фильтра Калмана и производит симуляцию их работы во времени.

В результате моделирования получены численные и графические результаты выходных сигналов подвижного объекта h_V и h_D , выходных оценок с фильтра Калмана h_{Ve} и h_{De} и численные оценки ошибок (средних квадратов). Полученные значения СКО дают максимальную величину ошибки оценивания, как 3σ : по дальности – 0,1 м, по скорости – 0,07 м/с, что на 10% лучше, чем приведено в статье [7].

Выводы

Алгоритм обработки информации, поступающей с радиодальномера и МЭМС акселерометра, работает на основе принципов инвариантности. Комплексная обработка информации осуществляется при наличии перекрестных связей. Математическая модель объекта наблюдения составлена в век-

торно-матричной форме с целью применения фильтра Калмана для борьбы с помехами.

В результате компьютерного моделирования получены оценки эффективности комплексной системы в условиях помех. Полученные результаты доказывают эффективность применения комплексной обработки информации при различной интенсивности помех, как для быстрых, так и для медленных измеряемых процессов. Однако для настройки фильтра Калмана в этом случае приходится проводить дополнительную идентификацию мощности помехи и сигнала.

Прикладным результатом исследования является применение предложенной методики построения математических моделей и алгоритмов оценивания фазового состояния в системах определения пространственного положения маневренных подвижных объектов в широком диапазоне сигналов и помех. Новизна исследований проявляется в обеспечении эффективности комплексной системы обработки информации в условиях случайной среды. Предложенные алгоритмы комплексной обработки информации при счислении координат маневренного объекта позволяют повысить точность измерительной системы.

Список литературы

1. Вавилов В.Д., Волков В.Л., Улюшкин А.В. Оптимизация параметров микромеханического акселерометра. Труды НГТУ. – Нижний Новгород: НГТУ, 2010. – № 82. – С. 308–314.
2. Волков В.Л. Моделирование процессов и систем: учебное пособие. – Нижний Новгород: НГТУ, 1997. 80 с.
3. Волков В.Л. Измерительные информационные системы: учебное пособие. – Нижний Новгород: НГТУ, 2009. – 243 с.
4. Волков В.Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра. Труды НГТУ. – Нижний Новгород: НГТУ, 2011. – № 87. – С. 288–295.
5. Волков В.Л., Жидкова Н.В. Математическое моделирование в приборных системах: учебное пособие. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – 147 с.
6. Волков В.Л., Жидкова Н.В., Жидков А.А. Эффективность работы микромеханических датчиков в условиях помех // Труды НГТУ. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – № 102. – С. 302–313.
7. Волков В.Л., Жидкова Н.В., Жидков А.А. Комплексная обработка информации в микро электромеханической системе. Труды НГТУ. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – № 104. – С. 305–316.
8. Волков В.Л., Улюшкин А.В., Желтова Н.Н. Эффективность микрогироскопа в условиях случайной среды // Управление большими системами: труды XI Всероссийской школы-конференции. – М., 2014. – С. 913–924.
9. Волков В.Л., Хрисанова М.В. Обеспечение статической и динамической точности микроэлектромеханического датчика угловой скорости // Труды НГТУ. – Нижний Новгород: НГТУ, 2013. – № 99. – С. 329–338.
10. Распов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
11. Hernandez W. A survey on optimal signal processing techniques applied to improve the performance of mechanical sensors in automotive applications // Sensors. – 2007. – Vol. 7. – P. 84–102.
12. Hernandez W. Improving the responses of several accelerometers used in a car under performance tests by using Kalman filtering // Sensors. – 2001. – Vol. 1. – P. 38–52.
13. Papoulis A. Probability, random variables, and stochastic processes. – NY: McGraw-Hill, 2001. – 571 p.

14. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. July 24, 2006.

References

1. Vavilov V.D., Volkov V.L., Ulyushkin A.V. *Optimizatsiya parametrov mikromekhanicheskogo akselerometra*. [Optimization of parameters of micromechanical accelerometer] / Proc. Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev. Nizhny Novgorod, 2010. no. 82. pp. 308–314.
2. Volkov V.L. *Modelirovanie protsessov i sistem. Uchebnoe posobie*. [Modeling of processes and systems. Textbook] / Nizhny Novgorod state technical university. Nizhny Novgorod, 1997. 80 p.
3. Volkov V.L. *Izmeritelnyye informatsionnyye sistemy. Uchebnoe posobie*. [Information-measuring systems. Textbook] / Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev. Nizhny Novgorod, 2009. 243 p.
4. Volkov V.L. *Obosnovaniye trebovaniy k parametram mikromekhanicheskogo akselerometra*. [Validation of requirements to parameters of micromechanical accelerometer] / Proc. Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev. Nizhny Novgorod, 2011. no. 87. pp. 288–295.
5. Volkov V.L., Zhidkova N.V. *Matematicheskoye modelirovaniye v pribornyykh sistemah. Uchebnoe posobie*. [Mathematical modeling in instrument systems. Textbook] / Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev. Nizhny Novgorod, 2014. 147 p.
6. Volkov V.L., Zhidkova N.V., Zhidkov A.A. *Effektivnost raboty mikromekhanicheskikh datchikov v usloviyakh pomekh*. [Efficiency of micromechanical sensors in conditions of interferences] / Proc. Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev. Nizhny Novgorod, 2014. no. 104. pp. 302–313.
7. Volkov V.L., Zhidkova N.V., Zhidkov A.A. *Kompleksnaya obrabotka informatsii v mikro elektromekhanicheskoy sisteme*. [Complex information processing in microelectromechanical system] / Proc. Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev. Nizhny Novgorod, 2014. no. 106. pp. 305–316.
8. Volkov V.L., Ulyushkin A.V., Zheltova N.N. *Effektivnost mikrogiroskopa v usloviyakh sluchaynoy sredy. Trudy XI Vserossiyskoy shkolyi-konferentsii «Upravlenie bolshimi sistemami»*. [Proc. XI All-russian school-conferences «Control greater system». Efficiency of microgyroscope in random environment]. Moscow, 2014. pp. 913–924.
9. Volkov V.L., Hrisanova M.V. *Obespecheniye staticheskoy i dinamicheskoy tochnosti mikroelektromekhanicheskogo datchika uglovoy skorosti*. [Provision of statical and dynamic accuracy of micromechanical angular velocity sensor] / Proc. Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev. Nizhny Novgorod, 2013. no. 99. pp. 329–338.
10. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory. Uchebnoe posobie*. [Micro mechanical instruments. Textbook] Moscow, Mashinostroeniye, 2007. 400 p.
11. Hernandez W. A survey on optimal signal processing techniques applied to improve the performance of mechanical sensors in automotive applications // Sensors. 2007. Vol. 7. pp. 84–102.
12. Hernandez W. Improving the responses of several accelerometers used in a car under performance tests by using Kalman filtering // Sensors. 2001. Vol. 1. pp. 38–52.
13. Papoulis A. Probability, random variables, and stochastic processes. NY: McGraw-Hill, 2001. 571 p.
14. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. July 24, 2006.

Рецензенты:

Вавилов В.Д., д.т.н., профессор кафедры «Авиационные приборы и устройства», ФГБОУ ВПО НГТУ, Арзамаский политехнический институт (филиал), г. Арзамас;
 Ямпурин Н.П., д.т.н., профессор кафедры «Конструирование и технология радиоэлектронных средств», ФГБОУ ВПО НГТУ, Арзамаский политехнический институт (филиал), г. Арзамас.

Работа поступила в редакцию 27.12.2014.