

---

# МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 629.7.05/06

В.Л. Волков<sup>1</sup>, Н.В. Жидкова<sup>1</sup>, А.А. Жидков<sup>2</sup>

## КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ)<sup>1</sup>,  
ООО Арзамасский электромеханический завод<sup>2</sup>

**Предмет, тема, цель работы:** Создание алгоритмов для микроэлектромеханической системы (МЭМС), обеспечивающих динамическую точность комплексной обработки информации, на основе принципов инвариантности.

**Методология проведения работы:** Составлена математическая модель МЭМС комплексной обработки информации, обеспечивающая минимальные динамические ошибки оценок. Разработана методика компьютерного эксперимента на основе *Matlab* для получения оценок эффективности МЭМС в условиях помех.

**Результаты:** Исследована работоспособность МЭМС комплексной обработки информации в условиях воздействия помех на основе инвариантных алгоритмов. Приведены результаты по значениям среднего квадрата ошибки (СКО) в численном и графическом видах в случае комплексной обработки информации, полученные при моделировании в реальных условиях среды.

**Значения исследования:** Применение предложенной методики обеспечения эффективности комплексной обработки информации дает минимальные СКО микроэлектромеханической системы в условиях реальных помех. Комплексная обработка информации эффективна для широкого диапазона сигналов и помех.

**Новизна/ценность:** На базе рассмотренных методик проектирования и исследования комплексной обработки информации в МЭМС сформулированы требования к алгоритмам по критерию динамической точности.

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

### Введение

Применение МЭМС в качестве источников информации для мобильных объектов управления (роботов, беспилотных подвижных аппаратов и т.п.) сопровождается искажением сигналов датчиков помехами, что создает существенные трудности в получении необходимой точности оценивания параметров движения объектов. Для снижения уровня помех необходимо применять дополнительные меры преобразования и обработки сигналов.

Специалисты по применению МЭМС для контроля параметров движения объектов активно обсуждают вопросы их эффективности в условиях случайных измеряемых физических процессов при воздействии помех [1–10]. Уже применяются реальные алгоритмы оптимальной обработки сигналов, способные функционировать в условиях случайной среды [4–7].

При этом учитывается, что МЭМС выполняются по интегральной технологии и имеют компенсационную схему измерений. Также для обеспечения статической и динамической точности МЭМС активно применяются корректирующие устройства (КУ) типа ПИД регулятора [2, 3]. Проведены исследования по обеспечению статической и динамической точности конкретных микроэлектромеханических датчиков, которые применимы для большого класса МЭМС независимо от их назначения и принципа действия [1–5].

В условиях реальной среды контролируемые параметры движения объектов управления имеют случайные отклонения от стационарных значений, а их измерение сопровождается случайными помехами. При этом выделяют режимы медленно и быстро меняющихся процессов, что соответствует работе динамических объектов управления на различных траекториях движения. Измерительные шумы чаще всего являются или белыми шумами, или широкополосными случайными вибрациями (ШСВ). С учетом таких шумов в статьях [4, 5] были получены результаты разработки и исследования эффективных алгоритмов фильтрации.

Однако многие важные вопросы остаются еще не исследованными, так в статье [7], где МЭМС акселерометр с фильтром Калмана используется для оценивания продольного и вертикального ускорения автомобиля, при эксплуатационных испытаниях не исследовано влияние мощности помех. Мощность помех, искажающих информацию, поступающую от датчика, считалась достаточно малой, хотя в реальных условиях имеет место достаточно широкий диапазон отношений мощности сигнала к помехе.

В статье [4] отмечалась возможность применения стандартного алгоритма фильтрации Калмана для комплексной обработки измерительной информации с МЭМС, традиционно используемых для контроля параметров движения маневренных объектов управления (т.е. с микроакселерометров и микрогироскопов). Однако в [4] также не получены результаты эффективности МЭМС при различных интенсивностях шумов и сигналов.

В публикации [5] рассматривалась эффективность применения фильтра Калмана для получения оптимальных оценок угловой скорости объекта управления при помехах в виде ШСВ. Здесь исследовалась эффективность фильтра Калмана для широкого диапазона соотношений мощности сигнала к мощности помехи. Ряд вопросов также остается не исследованным.

Следует отметить, что использование избыточности измерений для успешного информационного обеспечения подвижных объектов в настоящее время стало традицией. Вопросы комплексной обработки информации для МЭМС затрагивались в публикации [10], касающейся оценивания параметров ориентации и навигации малоразмерных летательных аппаратов. С целью получения избыточной информации применяют датчики первичной информации (ДПИ), частично дублирующие друг друга, использующие различные физические принципы для измерений [11]. В этом случае часто погрешности датчиков имеют различные причины возникновения и могут быть разделены по частотным диапазонам. Это позволяет компенсировать погрешности в широком диапазоне частот. При наличии информационной избыточности применяются алгоритмы комплексной обработки информации, позволяющие извлечь максимальную выгоду для обеспечения высокой точности измерительной системы. При этом часто удается минимизировать динамическую составляющую ошибки при оценивании параметров движения объектов на основе использования принципов инвариантности.

### **Математическая модель комплексной измерительной системы**

Известны схемы многоканальной комплексной обработки информации измерителей, как со специальными вычислителями, так и с использованием собственных свойств измерителей [11]. В некоторых случаях удается частично совместить устройство обработки информации с устройствами, входящими в состав самих измерителей. Такие схемы проще, более экономичны, что особенно важно в мобильной технике. Взаимная коррекция дает возможность обеспечить устойчивость работы измерителей, например, инерциальных, без нарушений условия инвариантности. Схема комплексной системы с взаимной коррекцией, приведенная в [11], включает в себя радиотехнический измеритель расстояния и инерциальный автономный счислитель пути. Взаимная коррекция осуществляется схемным путем через фильтры.

Несложными математическими преобразованиями для данной схемы удастся получить условие инвариантности динамической составляющей ошибки при оценивании дальности.

В продолжение исследований, представленных в [4], рассмотрим более конкретную схему комплексной обработки информации измерителей с перекрестными связями, включающую в себя радиодальномер и МЭМС для измерения скорости (рис. 1) [9].

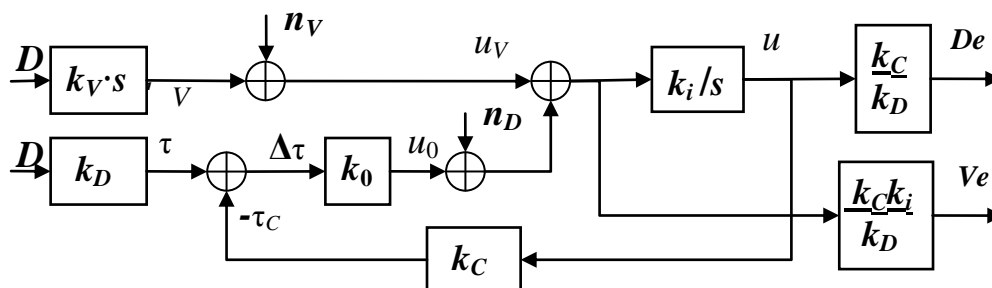


Рис. 1. Структурная схема комплексной обработки информации

Автономный измеритель, построенный на основе МЭМС микроакселерометра, выдает сигнал, пропорциональный скорости движения объекта. Этот сигнал, полученный в результате интегрирования ускорения, обладает ошибками, накапливаемыми во времени. Кроме того, микроакселерометру как МЭМС прибору присущи существенные флюктуационные шумы.

Радиотехнический измеритель в схеме рис. 1 определяет расстояние путем измерения временного интервала между запросным и ответным импульсами компенсационным методом. Временной интервал  $\tau$  связан с расстоянием  $D$  соотношением:  $\tau=k_P D$ , где  $k_P$  – коэффициент пропорциональности радиотехнического измерителя.

Сигнал дальности, пропорциональный временному интервалу  $\tau$ , сравнивается в компенсационной схеме с сигналом обратной связи  $\tau_C$ , вырабатываемым формирователем стробов. Сигнал ошибки, пропорциональный разности временных интервалов, поступает на интегратор, обеспечивающий астатизм первого порядка схемы измерения. Напряжение с выхода интегратора управляет через схему формирования стробов временным интервалом  $\tau_C$ . В компенсационной схеме учитывается флюктуационная помеха  $n_D$ , определяемая флюктуациями момента прихода ответного импульса, его формы и внутренними шумами радиоприборов. На вход интегратора поступает также сигнал, пропорциональный скорости перемещения объекта  $u_V$  с погрешностью  $n_V$ . Пренебрегая инерционностью элементов системы и считая их линейными, исследуем точность измерения расстояния такой системой. Покажем вначале, что напряжение на выходе интегратора является оценкой измеряемого расстояния. Представим уравнения элементов, согласно схеме рис. 1, в комплексной области:

$$u_0 = k_0(\tau - \tau_C); \tau = k_D \cdot D; \tau_C = k_C \cdot u; u \cdot s = k_i(u_0 + n_D + u_V);$$

$$u_V = k_V D \cdot s + n_V; De = k_C/k_D \cdot u; Ve = k_0 k_C \cdot u/k_V. \tag{1}$$

Исключив из этих уравнений внутренние переменные системы  $\tau$ ,  $\tau_C$ ,  $u_0$ ,  $u_V$ ,  $u$ , получим уравнения преобразования системы в операторной форме относительно измеряемых переменных – расстояния  $D$ , скорости  $V$  и их оценок –  $De$ ,  $Ve$ :

$$De = \frac{T_1 s + 1}{T s + 1} D + \frac{1}{k_0 k_D} \frac{1}{T s + 1} (n_V + n_D), \tag{2}$$

$$Ve = \frac{k_C}{k_D} \frac{T_1 s + 1}{T s + 1} V + \frac{1}{k_0 k_D} \frac{s}{T s + 1} (n_V + n_D), \tag{3}$$

где  $T = (k_i k_0 k_C)^{-1}$  – постоянная времени, обратная добротности системы  $Q$ ;

$T_1 = k_V / (k_0 k_D)$  – постоянная времени форсирующего звена.

Из уравнений (2), (3) следует, что инвариантность комплексной системы можно обес-

печить, одновременно выполняя равенства:  $T_1=T$ ,  $k_C=k_D$ , тогда с учетом выражений для  $T_1$ ,  $T$  и  $k_C$  получим требования к величине  $k_V$ :  $k_V=1/k_i$ .

Уравнения ошибок оценки дальности и скорости с учетом условия инвариантности имеют вид

$$E_D = De - D = \frac{1}{k_0 k_D} \frac{1}{Ts+1} (n_V + n_D); \quad (4)$$

$$E_V = Ve - V = \frac{1}{k_0 k_D} \frac{s}{Ts+1} (n_V + n_D). \quad (5)$$

При выполнении условия инвариантности ошибки комплексной системы по дальности и по скорости носят чисто флюктуационный характер (см. (4), (5)). Для ослабления ошибки дальности используется фильтр низкой частоты  $W_1=K/(Ts+1)$ , а для ослабления ошибки скорости – фильтр высокой частоты  $W_2=K \cdot s/(Ts+1)$ , где  $K=1/(k_0 k_D)$ . Обычно в схеме рис. 1 выбирается  $k_0=k_D$ , тогда для ослабления обеих ошибок требуется увеличение постоянной времени  $T$ . Однако существенное увеличение  $T$  приводит к уменьшению добротности системы и большой инерционности и в этом случае следует выбирать компромиссное решение.

### Пример моделирования комплексной измерительной системы

С целью конкретного рассмотрения решения задачи на основе *Matlab* по моделированию комплексной обработки информации в МЭМС измерителе дальности и скорости необходимо выполнить следующие этапы:

1. Использовать исходные данные характеристик измерителей и сигналов согласно гипотетическим.
2. Составить программу функцию для расчета параметров схемы рис. 1 и для дальнейшего моделирования ее работы во времени, используя условие инвариантности:  $k_C=k_D$ ,  $k_V=1/k_i$ .
3. Провести симуляцию схемы и получить оптимальное значение постоянной времени  $T$  путем статистических испытаний схемы (не менее 1000 испытаний).
4. Рассчитать итоговые значения параметров  $T$ ,  $T_1$ ,  $k_V$ ,  $k_C$ ,  $k_i$ .
5. Построить графики основных процессов (график  $De$  на фоне  $D$ ,  $Ve$  на фоне  $V$  и графики ошибок оценивания).
6. Рассчитать средние квадраты ошибок (СКО) оценок  $De$ ,  $Ve$ .

Пусть процесс изменения дальности задан в файле *D.txt* в виде линейной зависимости от времени с наложением случайных свойств, соответствующих спектральной плотности  $S_D$  случайной составляющей  $D(t)$ :

$$D(k)=D(k-1)-dD,$$

где  $dD$  – шаг изменения дальности, зависящий от скорости объекта ( $dD=V \cdot dt$ ,  $dt$  – период дискретности при измерении  $D$ ,  $V$  – скорость движения объекта). Данные в файле *D.txt* представлены в виде двух колонок – первая содержит метки времени, вторая – непосредственно расстояние до цели.

Дальность изменяется от некоторого начального значения  $D_0$  до конечного значения, равного  $0,1 \cdot D_0$ , что соответствует режиму сближения с целью. Случайные свойства процесса дальности определяются спектральной функцией низкочастотного сигнала –  $S_D(\omega)$ . Помеха радиотехнического измерителя дальности имеет высокочастотный характер, что определяется спектральной функцией  $S_{nD}(\omega)$ . Помеха инерциального измерителя скорости имеет низкочастотный характер, что определяется спектральной функцией  $S_{nV}(\omega)$ .

Пусть в качестве исходных данных для схемы рис. 1 известны характеристики сигнала и помех, соответствующие следующим формулам:

$$S_D(\omega) = \frac{2\sigma_D^2 \alpha_D}{(\omega^2 + \alpha_D^2)}; \quad S_{nD}(\omega) = \frac{\sigma_{nD}^2 \omega^2}{(\omega^2 + \alpha_{nD}^2)}; \quad S_{nV}(\omega) = \frac{\sigma_{nV}^2}{(\omega^2 + \alpha_{nV}^2)}, \quad (6)$$

где обозначено:

$S_D, S_{nV}, S_{nD}$  – спектральные функции процессов соответственно  $D(t), n_V(t), n_D(t)$ ;

$\sigma_D, \sigma_{nV}, \sigma_{nD}$  – среднеквадратические отклонения процессов соответственно  $g(t), n_V(t), n_D(t)$ ;

$\alpha_D, \alpha_{nV}, \alpha_{nD}$ , – коэффициенты корреляции процессов соответственно  $D(t), n_V(t), n_D(t)$ .

Основным в решении задачи комплексной обработки информации при заданных исходных данных является определение оптимального значения параметра низкочастотного фильтра  $W_1$ , т.е. фактически его постоянной времени  $T$ . Это решается методом статистического моделирования, примененным ранее в работе [8] для оптимизации измерительных устройств по точности.

В данном случае производится подбор коэффициента интегрирования  $ki$ , обеспечивающего минимум среднего квадрата ошибки оценивания (СКО). Найденное значение  $ki$  определяет параметр  $T$  по формуле  $T=(ki k_0 k_C)^{-1}$ . Предварительно параметры  $k_V$  и  $k_C$  выбираются из условия инвариантности:  $k_C=k_D, k_V=1/k_i$ .

Программа расчета и моделирования, составленная в *Matlab*, имеет управляющую часть и программу-функцию. Управляющая часть имеет вид:

```

CKOm=1e6; ind=0;
S=load('K_.txt');
ag=S(1); % коэффициента корреляции полезного сигнала;
sg=S(2); % СКВО полезного сигнала;
kv=S(3); % коэффициента инерциального ДПИ;
kd=S(4); % коэффициента радиизмерителя;
ko=S(5); % коэффициента усиления;
kio=S(6); % коэффициента интегратора;
kc=S(7); % коэффициента обратной связи;
Mu=S(8); % среднее значение входного полезного сигнала;
snd=S(9); % СКВО 1-го ВЧ шума радиоизмерителя;
and=S(10); % коэффициента корреляции 1-го ВЧ шума;
snv=S(11); % СКВО 2-го НЧ шума инерциального измерителя;
anv=S(12); % коэффициента корреляции 2-го НЧ шума инерциального измерителя;
DD=load('D.txt'); % чтение данных дальности;
for i=1:3600 t1(i)=DD(i,(var-1)*2+1);D1(i)=DD(i,(var-1)*2+2);end;
% ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ki ПРИ minCKO;
k=1; % счетчика;
while k<1000;
ki=0.01*kio+100*kio*rand(1,1); % равномерная вариация параметра kc;
[W1, CKOd, CKOv]=K(ag,sg,kv,kd,ko,ki,kc,snd,snv,and,anv,t,D,wm,ind);
if CKO<CKOm CKOm=CKO; ki0=ki; end;
k=k+1; end;

```

В управляющей программе использовано чтение некоторых исходных данных по конкретным параметрам спектральных функций  $S_D(\omega), S_{nD}(\omega), S_{nV}(\omega)$  из файла *K\_.txt*:  $ag=3,2$ ;  $sg=1$ ;  $k_V=2$ ;  $k_D=3 \cdot 10^{-6}$ ;  $k_0=3 \cdot 10^{+6}$ ;  $ki=0,07$ ;  $k_C=2,2$ ;  $snd=1$ ;  $snv=2$ ;  $and=0,1$ ;  $anv=1,1$ .

В управляющей программе использован вызов функции  $K()$ , которая осуществляет весь расчет параметров схемы и производит симуляцию ее работы во времени. Основное содержание функции  $K()$  следующее:

```

function[W1,kv,CKO]=K4(ag,sg,kv,kd,ko,ki,kc,snd,snv,and,anv,t,D,wm,ind);
kv=1/ki; kc=kd; % условие инвариантности;
T=1/(ki*kc*ko); % постоянная времени устройства обработки данных;
W1=tf(1,[T 1]); ПФ1 устройства обработки данных;
W2=tf([1 0],[T 1]); ПФ2 устройства обработки данных;
dt=t(2)-t(1); % период дискретности;
for i=1:length(D)-1 V(i)=(D(i+1)-D(i))/dt; end % скорость объекта;

```

```

V(length(D))=0; % конечное значение скорости объекта;
v=randn(length(t),1); % формирующий гауссовский шум;
nd=lsim(Wn1,v,t); nv=lsim(Wn2,v,t); % гауссовские помехи nd и nv;
nn=nd+nv; % сумма помех;
Ed=lsim(W1,nn,t)/(ko*kd); % ошибка оценивания по (4);
De=D+E; % оценка дальности;
CKOd=sum(Ed.*Ed)/length(Ed); % СКО оценивания D;
Ev=lsim(W2,nn,t)/(ko*kd); % ошибка оценивания по (5);
Ve=V+Ev; % оценка скорости;
CKOv=sum(Ev.*Ev)/length(Ev); % СКО оценивания V.

```

В результате статистического моделирования на основе скорректированных программ были получены следующие результаты:  $k_i=0,0042$ ;  $k_v=237,8$ ;  $k_c=3,0 \cdot 10^{-6}$ ;  $T=26,4$ ;  $CKOd=2,5 \cdot 10^{-5}$ ;  $CKOv=6,5 \cdot 10^{-6}$ . Полученное значение  $CKOd$  дает среднеквадратическое отклонение по дальности  $\sigma$ , равное 0,0045. Это характеризует максимальную величину ошибки оценивания, как  $3\sigma$ , равную 0,013 м. Предельное значение ошибки оценивания дальности подтверждается экспериментальным графиком ошибок, представленном на рис. 2.

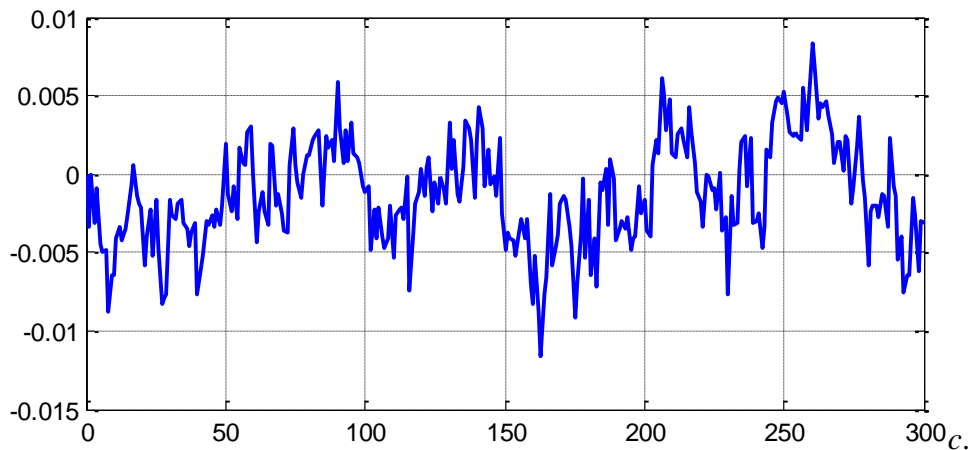


Рис. 2. График ошибки оценивания дальности

По результатам расчета и моделирования оптимального варианта комплексной системы построен также график оптимальной оценки дальности на фоне реального процесса (рис. 3).

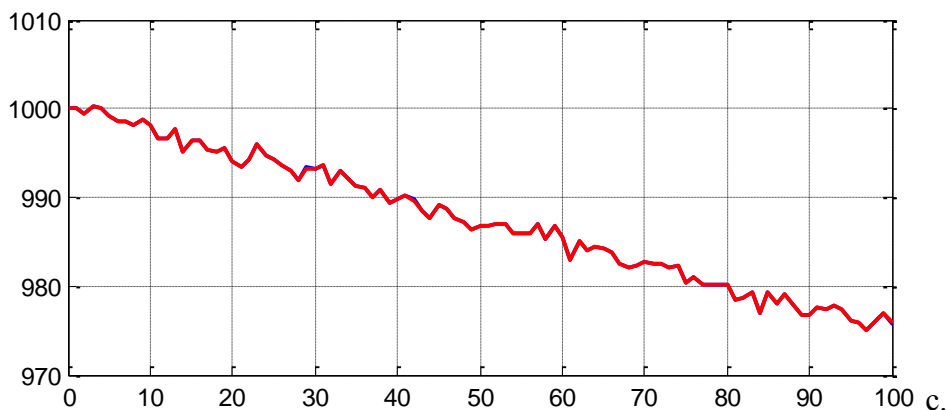


Рис. 3. График изменения дальности

Ошибка оценивания дальности настолько мала, что графики оценки и реального процесса дальности практически совпадают (рис. 3).

По результатам расчета и моделирования построен также график оптимальной оценки скорости на фоне реального процесса (рис. 4).

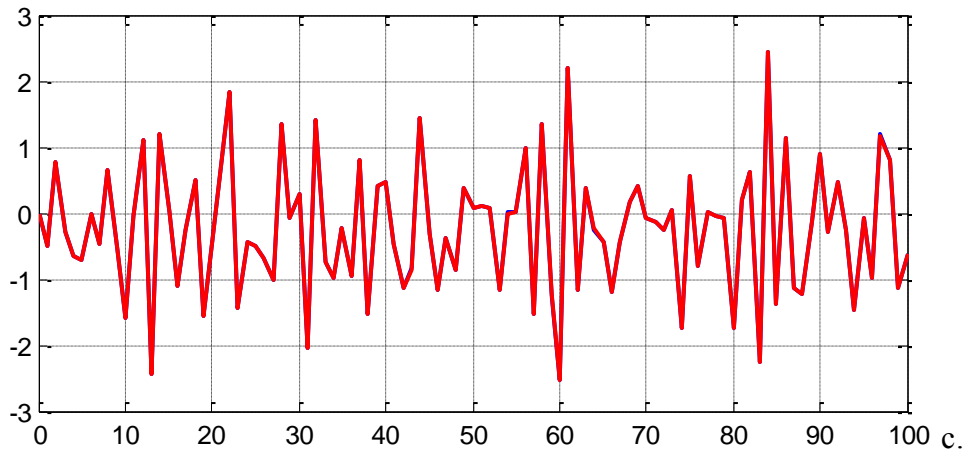


Рис. 4. График изменения скорости

Средний квадрат ошибки по скорости  $CKOv=6,5 \cdot 10^{-6}$  дает среднеквадратическое значение  $(CKOv)^{1/2}=0,0025$ , что в итоге дает предельную ошибку, равную 0,0075 м/с. Ошибка оценивания скорости настолько мала, что графики оценки и реального процесса скорости практически совпадают (рис. 4).

Предельное значение ошибки оценивания скорости подтверждается экспериментальным графиком ошибок, представленном на рис. 5.

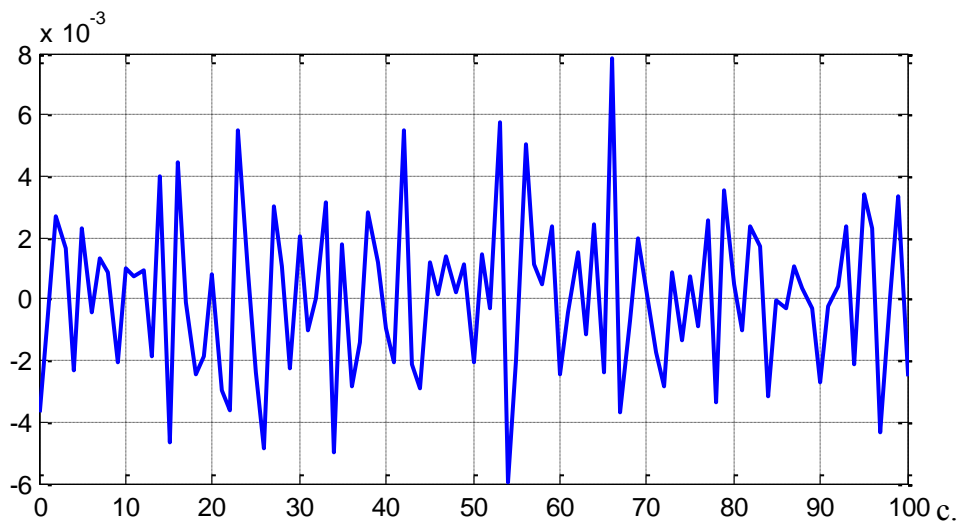


Рис. 5. График ошибки оценивания скорости

Следует отметить, что повышение быстродействия процессов дальности и скорости при комплексной обработке информации по схеме рис. 1 существенного изменения точности их оценивания не вносит.

### Заключение

В данной статье сформулированы требования к параметрам комплексной микроэлектромеханической системы с взаимной коррекцией по критерию динамической точности на основе принципа инвариантности.

Полученные результаты по эффективности комплексной обработки информации доказывают эффективность алгоритмов, как для быстрых, так и для медленных процессов.

Не исследованным остается вопрос влияния интенсивности помех на точностные характеристики комплексной системы.

## Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Оптимизация параметров микромеханического акселерометра / В.Д. Вавилов, В.Л. Волков, А.В. Улюшкин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. № 3 (82). С. 308–314.
2. **Волков, В.Л.** Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. № 2 (87). С. 288–295.
3. **Волков, В.Л.** Обеспечение статической и динамической точности микроэлектромеханического датчика угловой скорости / В.Л. Волков, М.В. Хрисанова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2013. № 2 (99). С. 329–338.
4. **Волков, В. Л.** Эффективность работы микромеханических датчиков в условиях помех / В.Л. Волков, Н.В. Жидкова, А.А. Жидков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. № 2 (102). С. 302–313.
5. **Волков, В. Л.** Эффективность микрогироскопа в условиях случайной среды / В. Л. Волков, А.В. Улюшкин, Н.Н. Желтова // Управление большими системами: мат. XI Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – М.: ИПУ РАН. 2014. С. 913–24.
6. **Hernandez, W.** A survey on optimal signal processing techniques applied to improve the performance of mechanical sensors in automotive applications // Sensors. 2007. V. 7. P. 84–102.
7. **Hernandez, W.** Improving the responses of several accelerometers used in a car under performance tests by using Kalman filtering // Sensors. 2001. V. 1. P. 38–52.
8. **Волков, В.Л.** Измерительные информационные системы: учеб. пособие / В.Л. Волков; НГТУ. – Н. Новгород, 2009. – 243 с.
9. **Волков, В.Л.** Математическое моделирование в приборных системах / В.Л. Волков, Н.В. Жидкова; НГТУ. – Н. Новгород, 2014. – 147 с.
10. **Тимошенко, С.П.** Математическая модель управления МЛА с использованием метода пропорциональной навигации в программе *Matlab* / С.П. Тимошенко, А.П. Кульчицкий // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 189–196.
11. **Иванов, Ю.П.** Комплексование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов / Ю.П. Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов; под ред. В.А. Боднера. – Л.: Машиностроение, 1984. – 207 с.

Дата поступления  
в редакцию 02.09.2014

V.L. Volkov<sup>1</sup>, N.V. Zhidkova<sup>1</sup>, A.A. Zhidkov<sup>2</sup>

**COMPLEX INFORMATION HANDLING  
IN MICROELECTROMECHANIC SYSTEM**

Arzamasskiy polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod  
state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Arzamas electromechanical plant<sup>2</sup>

**Purpose:** Creation algorithm for micro electromechanic system (MEMS), providing dynamic accuracy complex information handling, on base principle to invariance.

**Design/methodology/approach:** is Formed mathematical model MEMS complex information handling, providing minimum dynamic mistakes of estimations. The Designed methods of computer experiment on base Matlab for reception estimation to efficiency of MEMS in condition of hindrances.

**Findings:** Explored capacity to work MEMS complex information handling in condition of influence of hindrances to different intensity on base invariant algorithm. The Brought results on importances of average square of the mistake (SKO) in numerical and graphic type in event of complex information handling, got at modeling in real condition of ambience.

**Research limitations/implications:** Using offered methods of provision to efficiency complex information handling gives minimum SKO micro electromechanical system in condition of real hindrances.

**Originality/value:** On the base of the considered methodes of the designing and studies complex information handling in MEMS is worded requirements to algorithmes on criterion of dynamic accuracy.

*Key words:* MEMS, invariance, dynamic accuracy, average square of the mistake, modeling, efficiency.