

УДК 629.7.05/06

В.Л. Волков¹, Н.В. Жидкова¹, А.А. Жидков²**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ**Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО Арзамасский электромеханический завод²

Предмет, тема, цель работы: Получение методов обеспечения статической и динамической точности компенсационных микросистемных датчиков.

Методология проведения работы: Составлена математическая модель микросистемного датчика на основе оптимальных параметров корректирующего устройства, обеспечивающих минимальные динамические ошибки датчиков. Разработана методика компьютерного эксперимента на основе Matlab для получения оценок эффективности микромеханических систем в условиях помех.

Результаты: Исследована работоспособность микромеханических датчиков в условиях воздействия помех различной интенсивности с применением типовых фильтров. Представлены сравнительные результаты средних квадратов ошибок фильтрации Калмана, фильтрации Винера, апериодического фильтра в реальных условиях среды. Представлены результаты моделирования МЭМС в виде графиков средних квадратов ошибок. На графиках показана эффективность фильтра Калмана для широкого диапазона сигналов и помех.

Значения исследования: Применение предложенной методики обеспечения эффективности МЭМС дает минимальные средне квадратичные ошибки датчика в условиях различных помех.

Новизна/ценность: На базе рассмотренных методик проектирования и исследования МЭМС сформулированы требования к алгоритмам фильтрации по критерию динамической точности.

Ключевые слова: МЭМС, датчик, точность, чувствительность, средний квадрат ошибки, моделирование, фильтрация, эффективность.

Введение

В литературе наблюдается повышенный интерес к микроминиатюрным датчикам, построенным по микросистемной технологии [1–8]. Вопросы разработки и исследования таких датчиков связаны с применением физических законов, определяющих их принцип действия. Следует отметить, что принципы действия микромеханических датчиков разного назначения существенно отличаются друг от друга. Так, микромеханический датчик угловой скорости (ДУС) основан на эффекте Кариолисова ускорения, а микроакселерометр – на возникновении вращающих моментов или сил, действующих на подвижные массы, в соответствии с правилами традиционной механики. В данной статье, тем не менее, рассматриваются микроэлектромеханические системы (МЭМС) разного принципа действия, но имеющие ряд общих свойств.

Прежде всего, рассматриваемые МЭМС датчики выполняются по интегральной технологии на основе конструкционного материала кремния. *Во-вторых*, все рассматриваемые МЭМС приборы имеют компенсационную схему измерений. Основными показателями качества всех микромеханических датчиков при этом считается статическая и динамическая точность. Вопросы обеспечения статической и динамической точности МЭМС приборов затрагивались в ряде работ [4–7]. Так, для микромеханического акселерометра была показана возможность построения корректирующего устройства (КУ) с параметрами, обеспечивающими минимальные значения динамических ошибок [5, 6]. В работе [6] обсуждались вопросы по предельно допустимым отклонениям параметров КУ относительно оптимальных. Довольно убедительно в работах [6, 7] приведены результаты по учету влияния всех конструктивных параметров типового микромеханического датчика на крутизну статической характеристики и даны рекомендации к обеспечению стабильности этих параметров для достижения необхо-

димой статической точности. Выводы, полученные в названных работах относительно статической и динамической точности конкретных микромеханических датчиков, касаются достаточно широкого круга МЭМС независимо от их назначения и принципа действия.

Следует учесть, что при проектировании МЭМС датчиков, как правило, задаются диапазон измерения входной физической величины и предельная относительная ошибка датчика. Методика расчета конструктивных параметров датчика для заданного диапазона измерения в этом случае предполагает сначала вычисление соответствующего значения номинальной крутизны статической характеристики K , затем, с учетом предельно допустимой ошибки, формулирование требований к номинальным значениям конструктивных параметров и их возможным отклонениям [4]. Известно, что для компенсационной схемы измерения, при достаточно большом коэффициенте усиления в прямой цепи, крутизна характеристики K обеспечивается практически за счет коэффициента передачи чувствительного элемента датчика $K_{чэ}$ и коэффициента обратной связи $K_{ос}$: $K = K_{чэ} / K_{ос}$.

Это накладывает особые требования на стабильность этих параметров при воздействии возмущений среды. Часто в МЭМС приборах параметры $K_{чэ}$ и $K_{ос}$ оказываются взаимосвязанными и их расчет приходится вести при выполнении противоречивых условий. Тем не менее, всегда удается найти компромиссные решения, обеспечивающие в целом необходимую крутизну статической характеристики датчика и соответствующий диапазон измерения.

Важной задачей при расчете МЭМС датчиков на разные диапазоны измерения является выбор ключевых параметров, наиболее сильно влияющих на крутизну статической характеристики (этими параметрами можно регулировать задание диапазона измерения датчика). В этом случае, в методике расчета датчика, сначала решается задача определения величины ключевого параметра дающего крутизну K , затем рассчитываются другие сопутствующие параметры датчика. Далее с учетом коэффициентов влияния параметров предъявляются требования к их допустимым отклонениям относительно расчетных [4–7].

Постановка задачи

Кроме обеспечения статической точности в работе МЭМС датчиков, и в переходных режимах – динамической точности важным является обеспечение эффективной работы датчиков в реальных условиях случайной среды. В реальности, как полезные измеряемые физические величины, так и помехи имеют случайные свойства, которые принято описывать статистическими характеристиками – такими, как корреляционные и спектральные функции. Реальные условия случайной среды связаны с областями применения датчиков, при этом можно выделить работу датчиков при измерении медленно или быстро изменяющихся физических величин. Характер измерительных помех тоже существенно влияет на точностные характеристики датчиков. Особенно опасными считаются ШСВ помехи (широкополосная случайная вибрация) – наподобие белого шума [9].

Эффективная работа МЭМС датчиков в условиях случайной среды обеспечивается применением фильтров, ослабляющих помехи и по возможности полно пропускающих полезные сигналы. Традиционный калмановский алгоритм фильтрации эффективно оценивает полезные составляющие сигналов на фоне аддитивных белых шумов. Также часто применяют фильтр Винера и более простые фильтры, например, апериодические. Для выбора способа фильтрации МЭМС датчиков в условиях случайной среды требуется проведение исследования эффективности алгоритмов фильтрации. При этом, кроме теоретических оценок эффективности, необходимо для сравнения получить экспериментальные оценки.

Имитировать реальные условия случайной среды надо на основе вычислительного

эксперимента в современной программной среде *Matlab*, имеющей достаточные инструментальные средства для моделирования как МЭМС датчиков, так и сигналов со случайными свойствами [10].

Математическая модель МЭМС датчика

Оптимальный режим движения подвижных частей МЭМС датчика в режиме чувствительности обеспечивается отрицательной обратной связью (ОС). Приемник перемещений в микромеханическом датчике, как правило, выполняется по дифференциальной мостовой схеме включения преобразователя, что дает компенсацию влияния температурных погрешностей и исключает многие другие методические ошибки.

Для анализа работы МЭМС датчика в режиме динамики и с целью оптимизации его характеристик по аналогии с работами [4–7] составлена структурная схема, которая представлена на рис. 1.

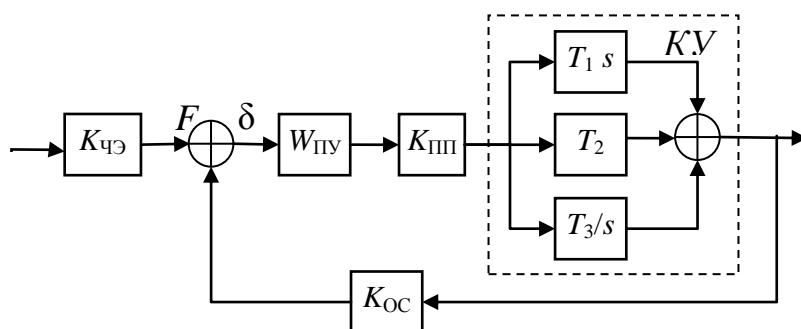


Рис. 1. Структурная схема МЭМС датчика:

- $K_{чЭ}$ – коэффициент передачи чувствительного элемента;
 $W_{ПУ}$ – передаточная функция подвижного узла;
 $K_{ПП}$ – коэффициент передачи емкостного преобразователя перемещений;
 T_1, T_2, T_3 – коэффициенты корректирующего устройства;
 $K_{ОС}$ – коэффициент передачи звена обратной связи

Общая передаточная функция, согласно структурной схеме, вычисляется в виде

$$W(s) = K_{чЭ} \frac{W_{ПУ} K_{ПП} W_{КУ}}{1 + W_{ПУ} K_{ПП} W_{КУ} K_{ОС}}, \quad (1)$$

где $W_{КУ} = T_1 \cdot s + T_2 + T_3/s$ – передаточная функция корректирующего устройства типа ПИД-регулятора (пропорционально-интегрирующе- дифференцирующего регулятора).

Основные математические модели чувствительного элемента, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи являются специфическими для разных типов датчиков и используются в соответствии с теоретическими положениями работ по МЭМС.

Корректирующее устройство типа ПИД-регулятор в микросистемных датчиках было применено еще в работе [4], далее обсуждались особенности выбора параметров КУ в работах [5–7]. В работе [5] на основе данного КУ была показана возможность достижения малой колебательности переходного процесса МЭМС или даже обеспечения его затухания по аperiодическому закону с достаточно малым временем. Далее в работах [6, 7] для разных МЭМС датчиков была показана возможность достижения малых значений динамических искажений – среднего квадрата ошибки (СКО) практически на уровне 10^{-7} , что для подобных приборов достаточно неплохой показатель.

Экспериментальное исследование основных характеристик микродатчиков

С целью расчета конструктивных параметров микросистемных датчиков и их передаточных функций на основе объектно-ориентированной среды было разработано программное

обеспечение, включающее управляющую программу и ряд программ-функций. В качестве среды проектирования программного обеспечения была выбрана матричная лаборатория *Matlab*, имеющая визуальную среду для отображения структурных схем, подобных рис. 1, и позволяющая изображать результаты испытаний (моделирования) устройства в виде графиков [8].

В частности, разработаны программы-функции для расчета параметров ДУС: $[Z, W_{pu}, W_{che}, W_{be}, W] = dus(P)$ и акселерометра: $[Z, W_{pu}, W_{che}, W_{be}, W] = acselerometer(P)$, входными данными которых являются векторы параметров датчика P (подвижного узла, блока электроники, конструкции). Выходными параметрами программ-функций являются передаточные функции: W_{pu} – подвижного узла; W_{che} – чувствительного элемента; W_{be} – блока электроники; W – полная передаточная функция датчика; Z – вектор расчетных параметров датчика.

Текст программ-функций $dus(P)$ и $acselerometer(P)$ на языке *Matlab* составлен в соответствии с принципом действия, теоретическими формулами механики, формулами для расчета коэффициента чувствительного элемента, первичного преобразователя, датчика обратной связи, формулами для вычисления передаточных функций (в работах автора это сделано для микроакселерометра [6] и для микро ДУС [7]). Примеры такого рода программ приводились ранее также в работе [5] (алгоритмы и тексты программ для микроакселерометра).

Использование программ-функций $dus(P)$ и $acselerometer(P)$ осуществляется путем предварительного задания входных данных – вектора параметров P . Все исходные параметры ЧЭ, и других элементов, необходимые для расчета при этом сведены в файл *input.dat* текстового формата *ascii*. Для расчета выходных параметров выполняется вызов $dus(P)$ или $acselerometer(P)$ из управляющей программы *control*:

```
Po=load('input.dat'); P= Po;
```

```
[Z,Wpu,Kche,Wbe,W]=dus(P) % вызов программы-функции и получение результатов.
```

Пример. При исходных данных ДУС для заданного диапазона измерения 150 град/с определены результирующие параметры. При использовании программы-функции dus рассчитаны все параметры ДУС (основные параметры приведены в табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры ДУС для диапазона ± 150 град/с

Параметр	K_{che}	m , кг	w , рад/с	G_y	K_{oc}	K	K_{pp}	U_{op} , В	U_{max} , В	T , с
Значение	$2,03e-9$	$4,03e-7$	$1,68e+3$	2,03	$8,85e-10$	2.292	$4e+10$	20	6	$1.6e-3$
Параметр	W_{max}	A_{tx}	B_{tx}	C_{tx}	A_{ty}	B_{ty}	C_{ty}	lk	bk	
Значение	$1,9 e-10$	$3,24e-4$	$1,0e-5$	$2e-6$	$1,0e-4$	$1,0e-5$	$2e-6$	$1e-4$	$1e-5$	

Соответствующие полученным параметрам передаточные функции представлены в табл. 2 (см. рис. 1).

Таблица 2

Передаточные функции ДУС, соответствующие структурной схеме МЭМС датчика

Передаточная функция подвижного узла	$W_{pu}(s) = \frac{1}{4 \cdot 107s^2 + 1,28 \cdot 10^{-3}s + 2,03}$
Передаточная функция КУ	$W(s) = \frac{4,03s^2 + 1,28 \cdot 10^4 s + 2,03 \cdot 10^7}{s}$
Полная передаточная функция датчика	$W_o(s) = \frac{4,54 \cdot 10^{-7} s^2 + 1,44 \cdot 10^{-3} s + 2,292}{2,8 \cdot 10^{-15} s^3 + 2,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 6,3 \cdot 10^{-4} s + 1}$

Далее решая задачу обеспечения точности рассматриваемых МЭМС приборов в условиях помех, рассмотрим эффективность применения различных алгоритмов фильтрации.

Фильтр Калмана для МЭМС

Задача построения фильтра Калмана для микромеханических датчиков возникает при обеспечении повышенной точности прибора в условиях измерительных шумов. Это в основном традиционная задача фильтрации Калмана для процесса со случайными свойствами. Схема объекта наблюдения для построения фильтра Калмана представлена на рис. 2.

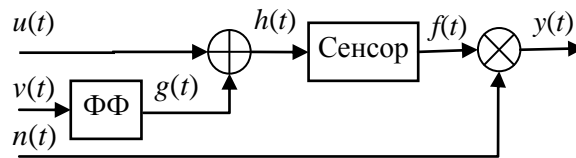


Рис. 2. Структурная схема объекта наблюдения

На схеме использованы обозначения: ФФ – формирующий фильтр случайной составляющей входного процесса; $v(t)$ – возмущающий белый шум на входе формирующего фильтра; $u(t)$, $g(t)$ – детерминированная и случайная составляющие измеряемого процесса; $n(t)$ – аддитивный белый шум измерения (интенсивность шума измерений – R); $h(t)$ – полный полезный измеряемый сигнал; $y(t)$ – измерение; $f(t)$ – выходной сигнал с сенсора.

Рассчитаем полную модель объекта наблюдения *Plant* в соответствии со схемой рис. 2. К наблюдаемой динамической системе в данном случае относится входной детерминированный стохастический процесс $h(t)$ и сенсор (ДПИ), измеряющий этот процесс. Пусть сенсор задан передаточной функцией $Wd(s)$, а входной процесс $h(t)$ задан случайной составляющей $g(t)$ со спектральной функцией $S_g(w)$ и средним значением $u(t)$.

Для исходных данных сенсора в виде МЭМС с учетом ПИД корректирующего устройства были получены оптимальные передаточные функции в виде [6, 7]:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (2)$$

где T – постоянная времени (примерное значение $T = 2 \cdot 10^{-9}$); K – коэффициент передачи сенсора (примерное значение $K=2,3873$ взято из [7]).

Пусть спектральная функция случайной составляющей $g(t)$ задана в виде

$$Sg(w) = \frac{c_1 w^2 + c_0}{d_2 w^4 + d_1 w^2 + d_0}, \quad (3)$$

где c_0, c_1, d_0, d_1, d_2 – коэффициенты числителя и знаменателя спектральной функции.

Для расчета формирующего фильтра процесса $g(t)$ используем факторизацию спектральной функции $S_g(w)$ в виде

$$Sg(s) = \frac{-c_1 s^2 + c_0}{d_2 s^4 - d_1 s^2 + d_0} = \frac{c_0}{d_0} \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \frac{-b_1 s + b_0}{a_2 s^2 - a_1 s + a_0} = Q \cdot Wg(s) \cdot Wg(-s), \quad (4)$$

где b_0, b_1, a_0, a_1, a_2 – коэффициенты числителя и знаменателя передаточной функции формирующего фильтра; $Q = c_0/d_0$ – интенсивность возмущающего белого шума на входе формирующего фильтра; $Wg(s)$ – передаточная функция формирующего фильтра.

После задания объекта наблюдения передаточными функциями, связывающими входы и выходы, легко выполнить переход к моделям в пространстве состояний. Модель объекта наблюдения при этом получается с двумя входами – u и v и одним выходом. Эта модель имеет: X – вектор состояния системы; U – вектор входа; V – вектор возмущения (или вектор формирующих белых шумов для стохастического сигнала); F – вектор выхода. Связь векторов U, V, X, F определяется матричным линейным дифференциальным уравнением состояния [11]:

$$\dot{X} = AX + Bu + Bv, \quad (5)$$

и уравнением выхода

$$f = CX, \quad (6)$$

где $v(t)$ - гауссовский шум с нулевым средним и интенсивностью $\dot{I} [v^2(t)] = Q$ (M - оператор математического ожидания);

A, B – переходные матрицы состояния (матрицы коэффициентов);

f – выходной сигнал;

C - матрица линейного преобразования размера $m \times n$.

Измерения параметров объекта наблюдения осуществляются с аддитивными гауссовскими шумами. Уравнение измерений удовлетворяет линейному соотношению:

$$y(t) = CX(t) + n(t), \quad (7)$$

где $n(t)$ - гауссовский белый шум измерений с интенсивностью $\dot{I} [n^2(t)] = R$.

Для получения матриц A, B, C моделей (5), (6) рассмотрим по отдельности матричные модели сенсора и формирующего фильтра. Дифференциальное уравнение работы сенсора в соответствии с передаточной функцией (2) имеет вид:

$$T \frac{df}{dt} + f(t) = K \cdot h(t). \quad (8)$$

Обозначим через X_1 выходную переменную фильтра – $f(t) = x_1$, тогда уравнение (8) получит следующий вид:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{T}x_1 + \frac{K}{T}(g + u). \quad (9)$$

Теперь запишем дифференциальное уравнение формирования процесса $g(t)$ на основе передаточной функции формирующего фильтра (4).

$$a_2 \frac{d^2g}{dt^2} + a_1 \frac{dg}{dt} + a_0g(t) = b_1 \frac{dv}{dt} + b_0v(t). \quad (10)$$

Перейдем от уравнения (10) к матричной модели методом вспомогательной переменной, используя в качестве компонент состояния x_2, x_3 . Матрицы A_2, B_2, C_2 при этом получают вид [11]:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0/a_2 & -a_1/a_2 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/a_2 \end{bmatrix}; \quad C_2 = [b_0 \quad b_1]. \quad (11)$$

Совместим полученные модели в единую матричную модель с учетом того, что $g=C_2 \cdot X$:

$$A = \begin{bmatrix} -1/T & C_2(1) & C_2(2) \\ 0 & 0 & A_2(1,2) \\ 0 & A_2(2,1) & A_2(2,2) \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} K/T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_2(2) \end{bmatrix}; \quad C = [1 \quad C_2(1) \quad C_2(2)]. \quad (12)$$

Для использования полученной матричной модели в *Matlab* необходимо учитывать правила ввода исходных данных с помощью функции *tf* [10].

Реализация расчетов матричной модели в *Matlab*. Вводятся исходные данные:

$Sg=tf([-16 \ 0 \ 4],[.0006 \ 0 \ -8 \ 0 \ 2.5]);$ $Wd=tf([2.3873],[1.646e-009 \ 1]);$

$Mg = 2.0944;$ $R=0.01.$

Передаточная функция формирующего фильтра процесса определена с помощью функции факторизации *fact* [11]:

$Wg=fact(Sg).$

$2 \ s + 1$

$Wg = \frac{\dots}{0.01549 \ s^2 + 1.797 \ s + 1}$

Получение коэффициентов для модели формирующего фильтра в *Matlab* осуществляется в виде.

```
[bg,ag]=tfdata(Wg,'v'); [bd,ad]=tfdata(Wd,'v');
bg=[ 0 2.0000 1.0000]; ag=[ 0.0155 1.7975 1.0000];
bd=[1.0e+009 * (0 1.4510)]; ad=[ 1 607600000].
```

Матричная модель реализуется в *Matlab* традиционно в виде [10]: $X'=AX+Bu$; $y=CX+Du$. С учетом обозначений в *Matlab* программе на основании (12) получим формулы для расчета матриц:

```
A=[-ad(2)/ad(1) 1/ad(1)*bg(3) 1/ad(1)*bg(2); 0 0 1; 0 -ag(3)/ag(1)-ag(2)/ag(1)];
B=[1/ad(1) 0; 0 0; 0 1/ag(1)];
C=[bd(2) bg(3) bg(2)];
D=[0 0].
```

Непрерывная матричная модель объекта наблюдения, соответствующая рассчитанным матрицам составлена в виде *Plant*:

```
Plant=ss(A,B,C,D,'inputname',{ 'u' 'v' },'outputname','f');
```

Фильтр Калмана, как непрерывный - *kalmN*, так и дискретный - *kalmD*, рассчитываются с использованием *Matlab* функции *kalman*. на основе модели *Plant* [10]. Для примера приведена команда для расчета непрерывного фильтра Калмана:

```
[kalmN,L,Pn]=kalman(Plant,Q,R).
```

Для расчета дискретного фильтра Калмана используется дискретная модель объекта контроля, полученная из непрерывной с помощью *Matlab* функции *c2d* [10].

Моделирование и исследование полученной измерительной информационной системы ИИС проведено с помощью визуальной среды *Simulink* [10]. Схема моделирования ИИС с непрерывным и дискретным фильтром Калмана представлена на рис. 3.

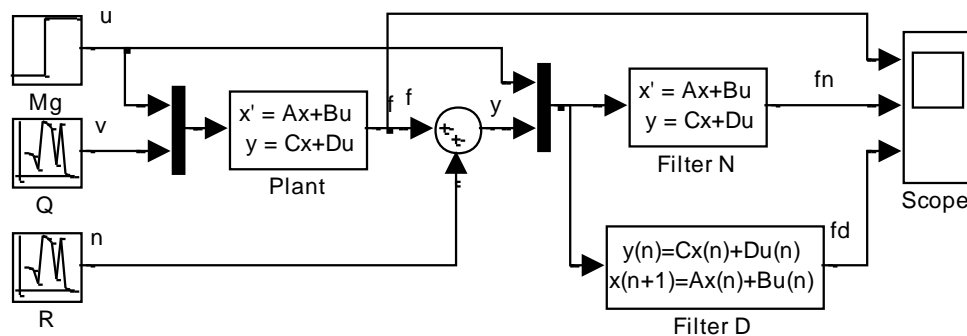


Рис. 3. Схема моделирования ИИС на основе фильтра Калмана

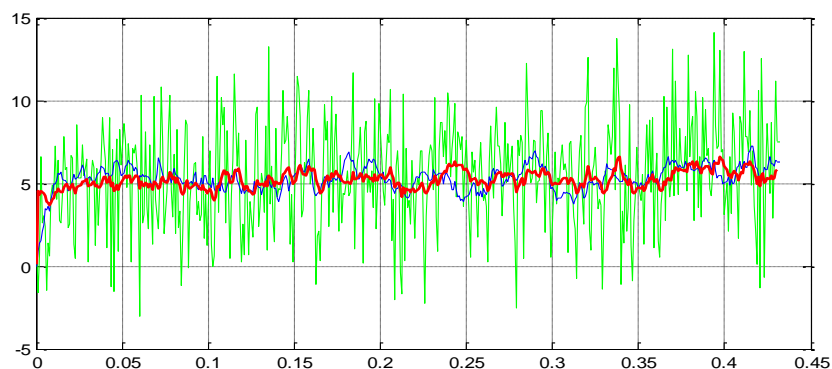


Рис. 4. Графики для дискретного фильтра Калмана (фонový график – это измерения $u(t)$, жирным выделен график сигнала с фильтра – $fn(t)$)

На схеме в качестве входов объекта контроля *Plant* показаны сигналы $u(t)$ и $v(t)$, являющиеся соответственно детерминированным (неслучайным) и возмущающим (случайным) сигналами.

На входе фильтра сформирован векторный сигнал, состоящий из сигнала $u(t)$ и измерения $y(t)$ (измерение $y(t)$ получено путем наложения помехи $n(t)$ на выходной сигнал $f(t)$ объекта $Plant$).

На рис. 4 представлены графики, полученные при моделировании дискретного фильтра Калмана при достаточно мощной помехе ($R=10$, что соответствует величине предельной ошибке в измерениях для МЭМС ДУС примерно 9 рад/с или $\xi=300\%$ от диапазона).

Для $R=10$ получен средний квадрат ошибки СКО = 0.49, эффект фильтрации при этом составляет $kd = 4.52$ (т.е. ошибка измерений уменьшается более чем в четыре раза). По данным СКО, предельная ошибка фильтра в оценивании полезного процесса составляет примерно: $\delta = 12,8\%$.

Проведено также моделирование дискретного фильтра Калмана при помехе $R=[1; 0,1; 0,01; 0,001]$. Для $R=1$ величина предельной ошибки в измерениях соответствует примерно 3 рад/с или $\xi=100\%$ от диапазона, для $R=0,1$ – 0,95 рад/с или $\xi=45\%$, для $R=0,01$ – 0,3 рад/с или $\xi=12,5\%$, для $R=0,001$ – 0,1 рад/с или $\xi=4\%$. Графики процессов при моделировании дискретного фильтра Калмана имеют похожий на рис. 3 вид (при уменьшенной интенсивности помехи). Результаты по предельной ошибке в измерениях ξ , значениям СКО, коэффициента фильтрации kd , предельной ошибке δ фильтра представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты моделирования МЭМС с фильтром Калмана

R	$\xi, \%$	СКО	kd	$\delta, \%$
10	300	0,49	4,52	12,8
1	100	0.2357	2.04	10
0,1	45	0.0612	1.32	5
0,01	12,5	0.009	1.06	2
0,001	4	0.00099	1.005	0,6

Обобщая результаты исследования фильтра Калмана при различной интенсивности помех, на рис. 5 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10).

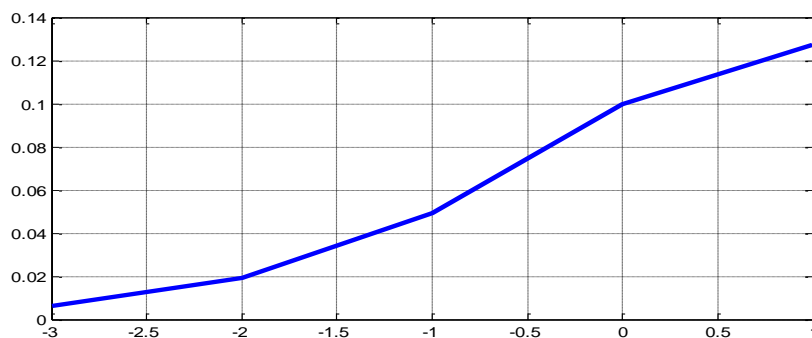


Рис. 5. График предельной ошибки фильтра Калмана

Эффективность фильтра Калмана при ослаблении измерительных помех оказалась довольно низкой. Фильтр Калмана обеспечивает погрешность менее 1% только при достаточно слабых шумах ($R=0,001$ – интенсивность помехи на уровне 4% от предельного сигнала).

Двойной апериодический фильтр для МЭМС

Следует исследовать возможность ослабления помехи за счет двойного апериодического фильтра с полосой пропускания, в 2 раза превышающей частотный диапазон полезных сигналов. Для этой цели используем максимальную частоту – ω_m , полученную для сигнала

при расчете периода дискретности (пусть $\omega m = 3651,4$ рад/с). Постоянная времени апериодического фильтра на основании импульсной теоремы при этом будет составлять: $T_0 = 1/(2 * \omega m) = 1,37 \cdot 10^{-4}$.

Обобщая результаты исследования двойного апериодического фильтра при различной интенсивности помех, на рис. 6 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10). Предельная ошибка фильтра изменяется от единиц процента (характерно для интенсивностей помехи от 0,001 до 0,1) до десятков процентов (15% при интенсивности помехи 1 и 63% при интенсивности помехи 10). Такой фильтр не справляется с помехами высокой интенсивности ($R \geq 1$, что соответствует величине предельной ошибки в измерениях примерно 3 рад/с или чуть более 100% от диапазона).

Следует признать, что результаты фильтрации для двойного апериодического фильтра получены хуже, чем у фильтра Калмана. Как поведет себя двойной апериодический фильтр при более медленном входном процессе (быстродействие процесса определяется спектральной функцией $Sg(\omega)$) предстоит исследовать несколько позже.

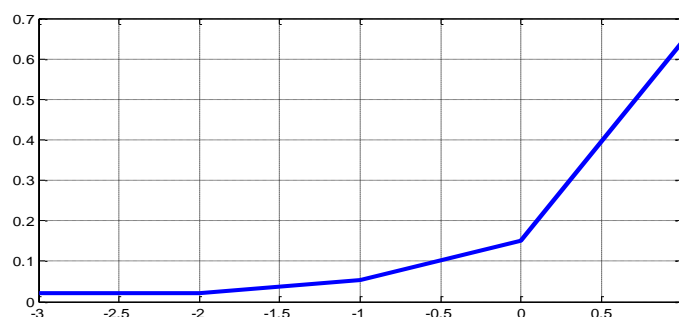


Рис. 6. График предельной ошибки аperiодического фильтра

Фильтр Винера для МЭМС

Далее исследуется возможность ослабления помехи с помощью фильтра Винера. Для этой цели используется передаточная функция фильтра Винера в условиях помех типа белый шум. Обобщая результаты исследования фильтра Винера при различной интенсивности помех, на рис. 7 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10).

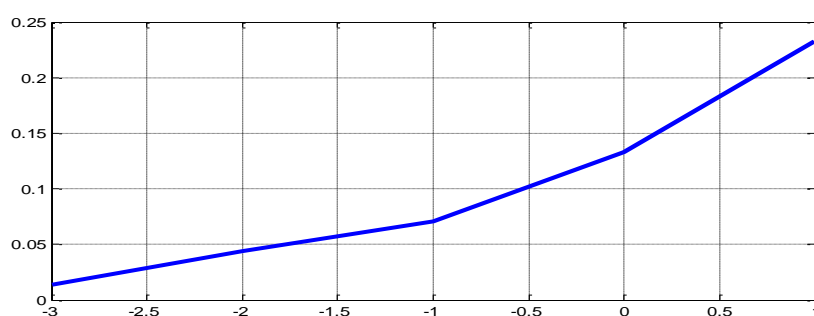


Рис. 7. График зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи для фильтра Винера

Результаты по ошибкам у фильтра Винера несколько хуже, чем у фильтра Калмана, но лучше, чем у двойного апериодического фильтра. Сравнивая эффективность работы фильтра Калмана, двойного апериодического фильтра и фильтра Винера, можно сделать вывод о необходимости применения фильтра Калмана для ослабления помех при любых условиях (при любой мощности помех). При этом фильтр Калмана должен быть адаптивным, т.е. дол-

жен быть настроен на конкретную интенсивность помех и спектральную функцию полезного сигнала, действующие в данный момент времени.

Исследование фильтрации при медленном входном процессе

Все результаты фильтрации, полученные ранее, были при достаточно быстром входном процессе $g(t)$. Следует также исследовать возможность ослабления помехи при других данных спектральной функции, соответствующей медленным процессам. На рис. 8 представлены графики спектральных плотностей быстрого (*a*) и медленного (*б*) процессов.

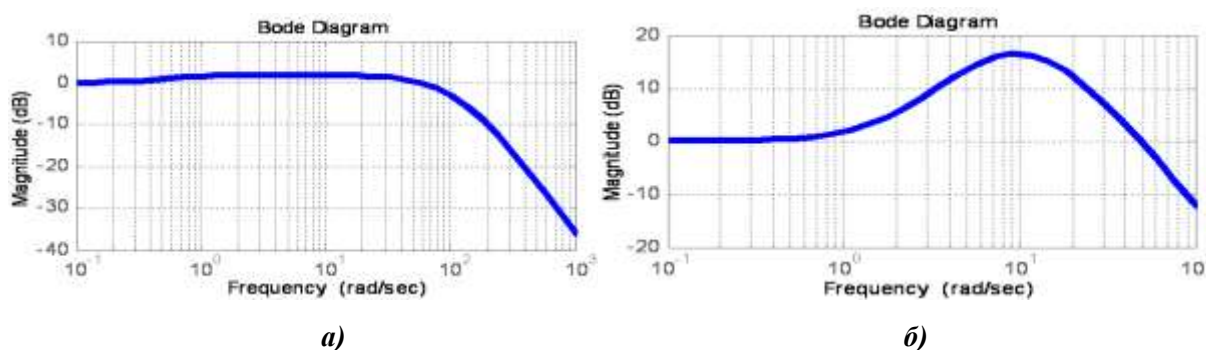


Рис. 8. S_g быстрого (*a*) и медленного (*б*) процессов

Исходные данные при исследовании фильтров для медленного процесса в *Matlab* были введены в виде:

$$S_g = tf([-2 \ 0 \ 8], [1 \ 0 \ -198 \ 0 \ 10201]).$$

Обобщая результаты исследования фильтра Калмана при различной интенсивности помех для медленного процесса, на рис. 9 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10).

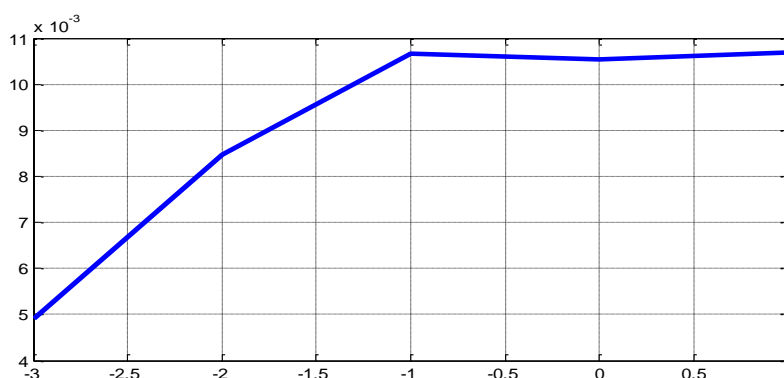


Рис. 9. График предельной ошибки фильтра Калмана от интенсивности помехи для медленного процесса

Результаты оказались вполне приемлемыми. Ошибка ИИС на основе фильтра Калмана в диапазоне от 0,5 до 1,08%. При больших интенсивностях помех ошибка всего на уровне 1,07% (1,08 % при интенсивности шума 0,1).

Было проведено также моделирование работы двойного апериодического фильтра и фильтра Винера для медленного процесса (см. рис. 8, *б*). Для фильтра Винера и двойного апериодического фильтра ошибки по сравнению с фильтром Калмана оказались несравнимо большими, особенно при больших интенсивностях шумов.

Сравнивая эффективность фильтрации измерительной помехи с помощью различных

фильтров, построены графики ошибок фильтрации для быстрого и медленного процессов. На рис. 10 приведены результаты ошибок в виде ансамбля графиков (кривые обозначены: А-фильтр – для двойного апериодического фильтра, В-фильтр – для фильтра Винера, К-фильтр – для фильтра Калмана).

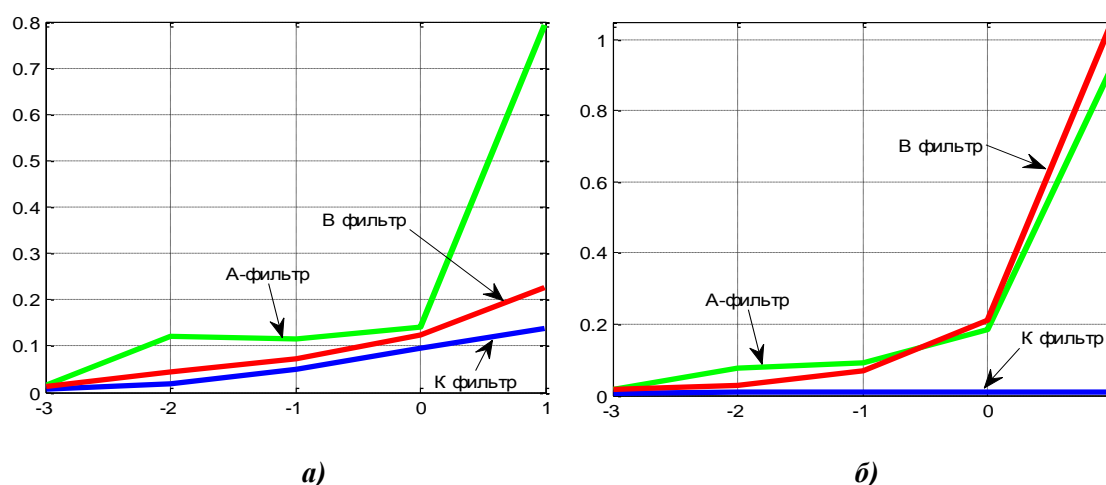


Рис. 10. Результаты ошибок в виде графиков:
а – для быстрого процесса; б – для медленного процесса

Заключение

В данной работе сформулированы требования к электромеханическим параметрам МЭМС датчиков по критерию статической точности, разработана методика расчета статических и динамических характеристик ДУС, соответствующих заданному диапазону измерения.

Полученные результаты по эффективности фильтрации доказывают эффективность применения адаптивного фильтра Калмана при различной интенсивности помех, как для быстрых, так и для медленных процессов.

Для быстрого процесса эффективность фильтра Винера оказывается сравнимой с фильтром Калмана, но для медленного процесса фильтр Винера практически неприемлем при больших интенсивностях помех.

Исследование возможностей фильтрации проведено еще не полностью. Для более корректных результатов эффективности фильтрации необходимо учитывать уровень помех по соотношению сигнал/шум, как это принято в теории информации.

Библиографический список

1. **Альмишев, И.В.** Разработка и оптимизация элементов роторно-вибрационного гироскопа / И.В. Альмишев [и др.] // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. статей по материалам ВНТК; НГТУ. – Н. Новгород – Арзамас, 2002. С. 402–408.
2. **Былинкин, С.Ф.** Расчет и исследование элементов и узлов интегрального датчика угловых ускорений / С.Ф. Былинкин, В.Л. Волков, О.Н. Глазков // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. статей по материалам ВНТК; НГТУ. – Н. Новгород – Арзамас, 2002. С. 392–397.
3. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учеб. пособие / В.Д.Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
4. **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.
5. **Волков, В.Л.** Исследование измерительных систем на компьютере / В.Л.Волков. – Арзамас: ООО “Ассоциация ученых”, 2011. – 64 с.
6. **Волков, В.Л.** Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. № 2 (87). С. 288–295.

7. 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.
8. Распопов, В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
9. Испытания на воздействие случайной широкополосной вибрации с использованием цифровой системы управления виброиспытаниями. ГОСТ Р 51502–99 (Международный стандарт МЭК 60068-2-64–93). – М., 1999.
10. Дьяконов, В.П. *Simulink 5/6/7*: самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс. 2008. –784 с.
11. Волков В.Л. Измерительные информационные системы: учеб. пособие / В.Л. Волков; НГТУ. – Н. Новгород, 2009. – 243 с.

Дата поступления
в редакцию 06.02.2014

V.L. Volkov¹, N.V. Zhidkova¹, A.A. Zhidkov²

EFFICIENCY OF MICRO MECHANICAL SENSORS IN CONDITIONS OF HINDRANCES

Arzamasskiy polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Arzamas electromechanical plant²

Purpose: Making methods of provision steady-states and dynamics accuracy compensation micro system sensors.

Design/methodology/approach: Is formed mathematical model of micro system sensor on base optimum parameter correcting device, providing minimum dynamic mistakes of sensor. The Designed methods of computer experiment on base Matlab for reception estimation to efficiency of micro mechanical systems in condition of hindrances.

Findings: Explored capacity to work micro mechanical sensors in condition of influence of hindrances to different intensity with using standard filter. Will Presented comparative results of average square mistake of filtering Kalman, filtering of Viner, aperiodic filter in reals conditions of ambience. The Presented results of modeling MEMS in manner graph of average squares mistakes. Efficiency of the kalman filter is shown on graph for signals and hindrances broad range.

Research limitations/implications: Using the offered methods of provision to efficiency MEMS gives minimum square-law mistakes of sensor in conditions of intensive hindrances.

Originality/value: On the base of considered methodes of designing and studies MEMS is worded requirements to algorithm of filtering on criterion by dynamic accuracy.

Key words: MEMS, sensor, accuracy, sensitivity, average square of the mistake, modeling, filtering, efficiency.