

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

**В.Д. Вавилов, В.Л. Волков, А.В. Улюшкин**

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ

Получены оптимальные значения параметров корректирующего устройства микромеханического акселерометра, обеспечивающие его оптимальность по точностному критерию. Сформулированы требования к допустимым границам параметров. Применение методики оптимизации параметров направлено на обеспечение информационной надежности датчика.

*Ключевые слова:* коэффициент влияния, критерий оптимальности, средний квадрат ошибки, допуск, МЭМС, акселерометр.

При наличии достаточно адекватной математической модели датчика его дальнейшее исследование эффективно провести путем компьютерного моделирования. При этом достаточно просто решается задача оптимизации параметров датчика по выбранному критерию качества. В специальной литературе приведены алгоритмы получения оптимальных решений для быстрого действия отработки датчиком входных сигналов, обеспечения минимальной динамической ошибки при работе датчиков в условиях наблюдения и задач фильтрации [1, 2].

Методики, используемые в работах [1, 2], основаны на статистических испытаниях Монте-Карло, которые применяются при исследовании объектов, в описании которых существенную роль играет статистическая вариация и которые включают в себя вероятностные процессы. При отсутствии случайностей в модель исследуемого объекта их включают искусственно.

Датчики первичной информации (ДПИ) могут быть отнесены к таким объектам. Так, технические характеристики датчиков (технологические размеры чувствительных элементов, величины сопротивлений и другие характеристики) имеют значительный статистический разброс. Причем чем более сложна, точна, чем более совершенна конструкция ДПИ, чем в более сложных условиях ДПИ работают, чем выше требования к ним, тем более важно знать влияние отдельных параметров на их показатели качества.

Исследование влияния ряда параметров микросистемного акселерометра на показатели качества является актуальной задачей. Даже если режимы эксплуатации МЭМС акселерометров одинаковы и они сами при выпуске имеют одинаковые номиналы параметров и выходных характеристик, тем не менее, у них могут быть разные коэффициенты старения элементов. А это приводит к тому, что партия однородных датчиков со временем становится неоднородной, возникают различия в «постоянных времени» и, в конечном итоге, «нулевого» сигнала, порога чувствительности, коэффициента передачи передаточной функции, времени переходного процесса, перерегулирования и других важных характеристик. Также сами

условия эксплуатации крайне разнообразны, и по этой причине создаются условия для неодинакового изменения технических характеристик и параметров, для отклонения их от номиналов.

Искусственно, с применением метода МК, необходимо вычислить коэффициенты чувствительности показателей качества акселерометра к различным параметрам, выявить наиболее важные из них и сформулировать требования к их допускам при изготовлении, и главное, при эксплуатации.

Задача поддержания характеристик акселерометра на заданном уровне может быть сформулирована как задача информационной надежности, т.е. способности измерительного устройства сохранять расчетные характеристики (информационную точность, быстродействие, частотные характеристики) в пределах допуска [3].

На стадии проектирования ДПИ для показателя качества  $J$  устанавливают его номинальное значение  $J_{\text{ном}}$  и предельные допустимые отклонения – нижнюю  $J_1$  и верхнюю  $J_2$  границы. Они определяют полуширину поля допуска  $dJ=(J_2-J_1)/2$  (в этом случае требования к уровню  $J$  задаются в виде  $J_{\text{ном}} \pm dj$ ). Необходимо, чтобы  $J$  попадало в поле допуска, тогда ДПИ по данному свойству считается работоспособным. На основе полученных требований к параметру  $J$  решается обратная задача – выявление допустимых значений аргументов, влияющих на  $J$ . Это особенно важно для исходных параметров, имеющих высокие коэффициенты влияния.

Установление численных значений границ  $J_1$  и  $J_2$  проводится на основе тактико-технических требований к ДПИ. При статистическом моделировании ДПИ находят среднеквадратическое отклонение и принимают  $dJ=k\sigma_j$ . Из этого условия определяется  $\sigma_j$  (часто  $k$  – коэффициент ширины поля допуска принимают равным 3 из условия доверительной вероятности 0,997 для нормального закона распределения).

Методом статистического моделирования находят коэффициенты чувствительности (коэффициенты влияния) параметров  $f_i$  ДПИ на выходную характеристику. Определяют среднеквадратические отклонения аргументов и их допустимые границы.

Кроме поставленной задачи, вероятностной по своей природе, не менее важной представляется математическая задача оптимизации. Здесь случайные вариации исходных параметров вводятся искусственно. Задача оптимизации часто предшествует задаче формирования допусков на исходные параметры ДПИ.

В состав математического обеспечения компьютерной реализации метода МК как для задачи определения допустимых границ параметров акселерометра, так и для задачи оптимизации входят: подпрограмма – модель ДПИ и его показателей качества, управляющая программа вариации параметров ДПИ, программа статистической обработки.

### 1. Математическая модель акселерометра.

Математическая модель определяет функциональную связь между исследуемой выходной характеристикой и входными величинами (исходными параметрами). В данной статье основным показателем качества акселерометра рассматривается средний квадрат динамической ошибки выходного сигнала. Этот показатель может быть вычислен как теоретически, так и экспериментально. Теоретический расчет предполагает вычисление интегральных зависимостей от переходной функции датчика при ступенчатом воздействии. Более эффективен при использовании метода МК экспериментальный расчет, сводящийся к численному интегрированию переходной функции.

Математическая модель акселерометра рассматривалась в работах [4, 5]. Схема измерительного устройства на базе микросистемного компенсационного акселерометра представлена на рис. 1.

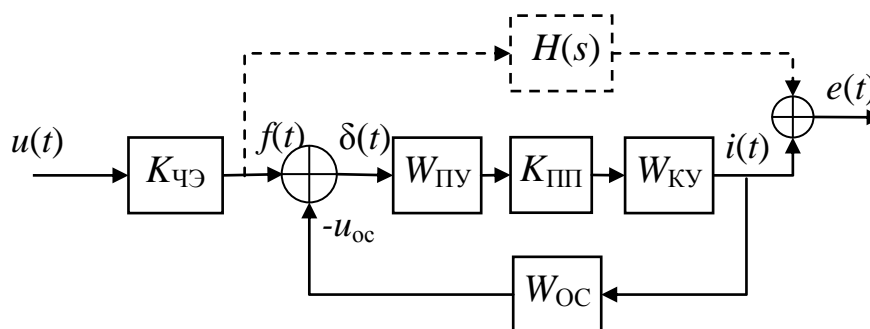


Рис. 1. Структурная схема датчика с коррекцией

На схеме обозначено:  $K_{чЭ}$  - коэффициент передачи чувствительного элемента;  $W_{ПУ}$  -

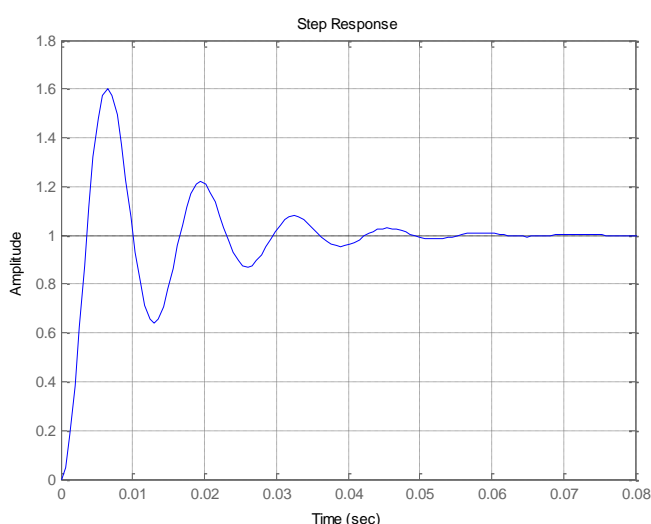


Рис. 2. Переходная функция

передаточная функция подвижного узла (маятника);  $K_{ПП}$  - коэффициент передачи преобразователя перемещения;  $W_{КУ}$  - передаточная функция усилителя с корректирующим устройством (КУ);  $W_{Н}$  - передаточная функция нагрузки;  $W_{Вых}$  - передаточная функция выходной RC цепочки;  $K_{ОС}$  - коэффициент передачи силового элемента обратной связи;  $H(s)$  - идеальный оператор передачи измеряемого сигнала.

Основные математические модели интегрального маятника, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи представлены в учебнике В.Д. Вавилова [5] и более подробно применительно к компьютерному моделированию основных характеристик в среде

*Matlab* в учебном пособии [6].

Общая передаточная функция, согласно структурной схеме, имеет вид.

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

При использовании программы из [6] получены результаты предварительного расчета при начальных исходных данных без КУ, при наличии газового демпфирования с помощью азота.

Для датчика построен график переходной функции (рис. 2).

Расчетные параметры передаточной функции датчика представлены в табл. 1. При наличии демпфирования (датчик заполнен азотом) передаточная функция подвижного узла получена четвертого порядка [5]. Средний квадрат динамической ошибки составляет  $3,6 \cdot 10^{-3}$ .

Частотные характеристики показывают наличие динамической устойчивости, хотя и с ярко выраженным резонансным пиком. Запас устойчивости по фазе  $2,45^\circ$ , а запас устойчивости по амплитуде абсолютный, что явно указывает на необходимость КУ.

Переходный процесс является колебательным асимптотически затухающим с большим перегулированием. Время переходного процесса сильно затянуто (около 0,06 с). На структурной схеме рис. 1 показано включение КУ, способного обеспечить необходимые динамические характеристики. Необходимо сформулировать требования к КУ.

Таблица 1

## Параметры передаточной функции датчика

Параметр	Значение
Коэффициент чувствительного элемента	$K_{\text{ЧЭ}} = 2,5 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент обратной связи	$K_{\text{ОС}} = 1,4 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент первичного преобразователя	$K_{\text{ПП}} = 877,5$
Передаточная функция подвижного узла	$W_{\text{ПУ}}(s) = \frac{1,003s^2 + 5,4s + 1,9 \cdot 10^{-5}}{5,1 \cdot 10^{-8}s^4 + 2,3 \cdot 10^{-6}s^3 + 2,2 \cdot 10^{-5}s^2 + 3,9 \cdot 10^{-10}s + 8,4}$
Полная передаточная функция	$W(s) = \frac{4302s^2 + 2,3 \cdot 10^4s + 0,082}{s^4 + 162,1s^3 + 2,4 \cdot 10^5s^2 + 1,3 \cdot 10^6s + 4,58}$

**2. Задача оптимизации параметров динамической точности.**

Необходимо определить вектор параметров ДПИ  $F$ , обеспечивающий минимум показателя качества, который выражается аналитическим функционалом (2) или вычисляется на основе моделирования работы ДПИ:

$$J = Q\{F, X(t), U(t)\}, \quad (2)$$

где  $X(t)$  – вектор состояния процессов в ДПИ в момент  $t$ ;  $U(t)$  – вектор входных воздействий.

Оптимизация проводится по критерию минимума среднего квадрата динамической ошибки датчика при анализе реакции на детерминированное ступенчатое воздействие.

При использовании этого метода вектор параметров  $F$  варьируют в допустимых границах случайным образом и вычисляют при каждом статистическом испытании функционал качества  $Q(F)$ . Затем при достижении достаточного статистического материала определяют экстремум функционала и выявляют соответствующие ему оптимальные значения вектора  $F$ . Данная методика более подробно рассмотрена в работе [1].

В качестве функционала используется выражение СКО ИУ. Изменяемыми параметрами векторного аргумента  $F$  в этом случае являются параметры КУ. Эти параметры могут быть изменены в ограниченных пределах, определяемых физически реализуемыми параметрами. Ограничения также накладываются на один из ключевых параметров переходного процесса ИУ – перерегулирование. Нахождение в допуске данного параметра определяет такие важные показатели качества, как запас устойчивости динамичной системы и время переходного процесса.

Наиболее эффективным корректирующим устройством предполагается КУ, построенное по принципу ПИД-регулятора.

Одно из важных требований, предъявляемых к системам регулирования, заключается в том, чтобы постоянное входное воздействие обрабатывалось без установившейся ошибки. Для статических систем при классическом синтезе этого можно добиться с помощью включения ПИД-регулятора или изодромного регулятора (ПИ-регулятора). Корректирующее устройство типа ПИД-регулятора, включенное в прямой цепи, в этом случае имеет следующую передаточную функцию:

$$W_{ky} = T_3s + T_2 + T_1 / s = \frac{T_3s^2 + T_2s + T_1}{s}. \quad (3)$$

где  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – коэффициенты пропорциональности звеньев: интегрирующего, пропорционального, дифференцирующего. Структурная схема акселерометра с КУ данного типа представлена на рис. 3.

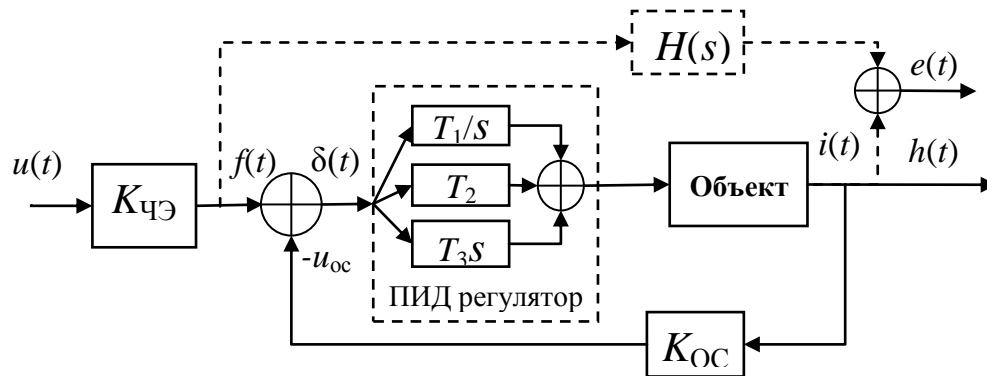


Рис. 3. Структурная схема датчика с ПИД-регулятором

Регулируемая величина при ПИД-регуляторе стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая. Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от измеряемого значения, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей.

Передаточная функция КУ, полученная в результате статистической оптимизации, имеет следующий вид:

$$W_{\text{КУ}}(s) = \frac{762,9s^2 + 0,0706s + 0,008}{s} \quad (4)$$

Полная передаточная функция датчика с ПИД корректирующим устройством имеет следующий вид.

$$W(s) = \frac{4,4 \cdot 10^5 s^4 + 2,3s^3 + 181,5s^2 + 17,3s + 6,1 \cdot 10^{-5}}{5,1 \cdot 10^{-8} s^5 + 1,2s^4 + 6,7s^3 + 5,2 \cdot 10^{-4} s^2 + 4,9 \cdot 10^{-5} s + 1,7 \cdot 10^{-10}}$$

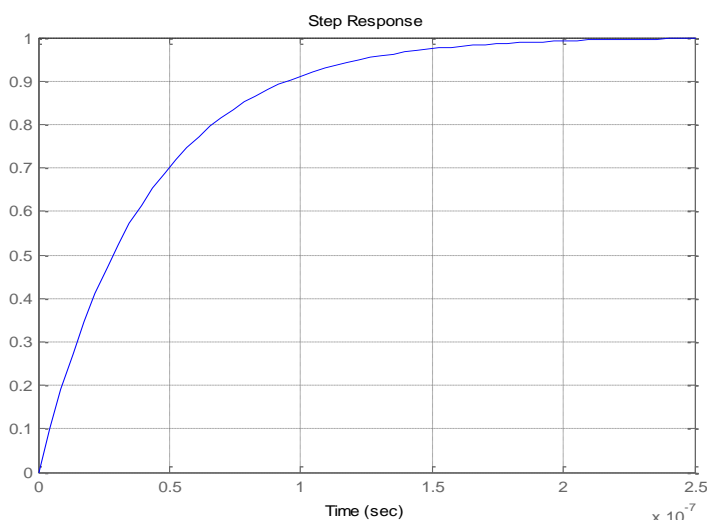


Рис. 4. График переходного процесса оптимального акселерометра

График переходного процесса для оптимального случая корректирующего устройства представлен на рис. 4.

СКО составляет  $1,0 \cdot 10^{-7}$ , что существенно меньше, чем без применения КУ. Выигрыш в точности составляет 189,7. Также существенно снижено время переходного процесса:  $t_{\text{ПП}} = 2,5 \cdot 10^{-7}$  с. Полоса пропускания датчика существенно возросла с  $\omega_c = 1 \cdot 10^2$  до  $\omega_c = 2 \cdot 10^7$  рад/с, что также свидетельствует о повышении быстродействия и улучшении динамических характеристик. Перерегулирование нулевое, статическая ошибка является нулевой.

### 3. Задача обеспечения допустимых отклонений СКО от минимума.

Насколько достигнутый путем экспериментальных расчетов минимум СКО динамической ошибки датчика может быть обеспечен практически? Разброс конструктивных параметров датчика, а также неточность исполнения КУ приводят к уходу СКО от точки мини-

му. Реальное значение СКО оказывается несколько выше минимально возможного. Поставим задачу оценивания допуска на параметры датчика и КУ при заданном допуске на минимум СКО относительно расчетного.

Задача определения коэффициентов чувствительности  $dJ/df_i$  параметров ДПИ решается следующим образом. Производится моделирование работы ДПИ при номинальных значениях параметров (оптимальных параметрах КУ). При этом исследуемому параметру задаются случайные вариации с нормальным законом распределения, что соответствует практике. Регистрируется выходная характеристика  $J$  и определяется ее дисперсия. Коэффициент чувствительности  $i$ -го параметра определяется в виде [2]

$$\frac{dJ}{df_i} = \frac{\sigma_J/J}{\sigma_{f_i}/f_i} \quad (5)$$

Найдем в первую очередь коэффициенты чувствительности для параметров КУ, непосредственно влияющих на СКО динамической ошибки акселерометра.

Используем результаты решения задачи минимизации СКО, где были получены численные значения постоянных времени КУ, которые определяют передаточную функцию КУ (3) в конкретном виде (см. формулу (4)).

Вычислительный эксперимент для каждой постоянной времени КУ дал коэффициенты чувствительности, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты чувствительности параметров КУ

$f_i$	Мат.ож. $M(f_i)$	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{f_i}$	Число испытаний	Мат.ож $M(\text{СКО})$	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{СКО}}$	Кoeff. влияния $k_i=dJ/df_i$
$T_1$	0,008	0,01	5000	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-14}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$
$T_2$	0,071	0,1	5000	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-17}$	$7,9 \cdot 10^{-11}$
$T_3$	762,9	100	5000	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	0,1172
Все параметры с $M(f_i)$ , $\sigma_{f_i}$			10000	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	

Для определения допусков на исходные параметры зададим требования к выходной характеристике с точки зрения выполнения эксплуатационных характеристик и с точки зрения конструктора ДПИ как эксперта (в данном случае к СКО). Здесь надо учитывать и допустимые значения оптимизируемой выходной характеристики и целесообразность (может быть даже физическую выполнимость) реализации "жестких" допусков на исходные параметры. Если задаваться допуском  $\omega\%$  от минимального значения СКО, то легко найти соответствующие среднеквадратические отклонения  $\sigma_{f_i}$  параметров и поля допусков. Значения  $\sigma_{f_i}$  определяем на основе (5), где  $f_i$ ,  $dJ/df_i$  берутся из табл. 2, а  $J=\min\{\text{СКО}\}$ .

Например, при 5%-ном допуске на СКО динамической ошибки выходного сигнала получим среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\text{СКО}}=0,05\min\{\text{СКО}\}/3=1,67 \cdot 10^{-9}$ , при этом соответствующие  $\sigma_{f_i}$  вычисляются на основании (5) по формуле

$$\sigma_{T_i} = \frac{T_i}{\text{СКО}_{\min}} \frac{\sigma_{\text{СКО}}}{k_i} \quad (6)$$

и имеют значения:  $\sigma_{T_1}=349,1$ ,  $\sigma_{T_2}=1,48 \cdot 10^7$ ,  $\sigma_{T_3}=108,5$ . Первые две величины возможных среднеквадратических отклонений параметров  $T_1$  и  $T_2$  указывают, что практически СКО датчика не критично к этим параметрам. Последняя величина  $\sigma_{T_3}=108,5$  указывает на то, что параметр  $T_3$  имеет следующие допустимые значения (из расчета предельного отклонения по правилу  $3\sigma_{T_3}$ ):

$$T_3 = 762,9^{-\frac{+325,5}{-325,5}}$$

## Выводы

Получены оптимальные значения параметров корректирующего устройства микро-механического акселерометра. Предъявлены требования к допустимым границам параметров для обеспечения информационной надежности датчика. Примененный метод статистического моделирования для решения задачи оптимизации параметров датчика может быть распространен для других измерительных устройств, когда вектор оптимизируемых параметров имеет ограниченную размерность (до 15–20).

## Библиографический список

1. **Волков, В.Л.** Измерительные информационные системы: учеб. пособие / В.Л. Волков. – Н. Новгород: НГТУ, 2009. – 242 с.
2. **Волкова, Н.В.** Исследование датчиков первичной информации методом статистических испытаний Монте-Карло // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Приборостроение в аэрокосмической технике". – Арзамас. 1999. С. 24-28.
3. **Дмитриев, С.П.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / С.П. Дмитриев, Н.В. Колесов, А.В. Осипов – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. – 208 с.
4. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
5. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов. – Н. Новгород: НГТУ, 2003. – 503 с.
6. **Вавилов, В.Д.** Компьютерное моделирование характеристик микросистемных датчиков / В.Д. Вавилов. – Н. Новгород: НГТУ, 2007. – 80 с.

*Дата поступления  
в редакцию 06.07.2010*

**V.D. Vavilov, V.L. Volkov, A.V. Ulyushkin**

## OPTIMIZATION PARAMETER OF MICROMECHANICAL ACCELEROMETER

They Are Received best values parameter correcting device micromechanical accelerometers, providing his optimization on accuracy criterion. The Worded requirements to possible border parameter. Using the methods to optimization parameter is directed on provision of information reliability of the sensor.

*Key words:* factor of the influence, criterion optimization, average square of the mistake, tolerance, MEMS, accelerometer.