

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Л. Волков, М.В. Хрисанова

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ  
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ**

Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ)

Сформулированы требования к электромеханическим параметрам МЭМС датчика угловой скорости (ДУС) по критерию статической и динамической точности. Выявлены доминирующие параметры, определяющие нестабильность крутизны статической характеристики датчика. Определены оптимальные параметры, соответствующие минимальной динамической ошибке датчика. Разработана методика расчета параметров ДУС и его статических и динамических характеристик, дающая минимальные среднеквадратические ошибки датчика для реальных диапазонов измерения.

Ключевые слова: МЭМС, датчик угловой скорости, статическая характеристика, точность, чувствительность, средний квадрат ошибки, моделирование.

**Постановка задачи**

В ряде работ по микросистемной технике затрагивались вопросы обеспечения статической и динамической точности датчиков [1, 2]. Так для микромеханического акселерометра, модель которого представлена в работах [1, 3], была показана возможность построения корректирующего устройства (КУ) с параметрами, обеспечивающими минимальные значения динамических ошибок [1]. Там же были выявлены предельно допустимые отклонения параметров КУ относительно расчетных.

В работе [2] исследовано влияние всех конструктивных параметров микромеханического акселерометра на крутизну статической характеристики и сформулированы требования к предельным значениям параметров на основе обеспечения необходимой статической точности. Эта задача решалась путем выявления параметров, наиболее сильно влияющих на показатель качества статической точности.

Аналогичная задача может быть рассмотрена для микросистемного датчика угловой скорости (ДУС). ДУС конструктивно выполняется так же, как и акселерометр по интегральной технологии на основе конструкционного материала кремния [4]. Однако принцип действия ДУС существенно отличается от акселерометра и соответственно формулы для расчета характеристик ДУС имеют принципиально иной вид.

Задача определения коэффициентов чувствительности параметров для одного из основных параметров ДУС – крутизны статической характеристики ( $K$ ), как и для акселерометра, может быть решена методом статистических испытаний [2]. При статистических испытаниях производится моделирование работы датчика с номинальными значениями параметров при случайных вариациях этих параметров. В каждом испытании вычисляются отклонения варьируемых параметров от их номинальных значений –  $\delta f_j(k)$ , а также показателя качества  $K$  относительно своего номинального значения –  $\delta K(k)$ . Коэффициент чувствительности  $\Psi_j(k)$   $j$ -го параметра в  $k$ -м испытании при этом определяется в виде

$$\Psi_j(k) = \frac{\delta K(k)}{\delta f_j(k)}. \quad (1)$$

Среднее значение коэффициента влияния для каждого параметра вычисляется в виде:

$$\Psi_j = \sum_{k=1}^N \frac{\Psi_j(k)}{N}. \quad (2)$$

где  $N$  – число статистических испытаний. Коэффициенты чувствительности показателя каче-

ства  $K$  к параметрам необходимо знать для дальнейшего обеспечения допустимой погрешности этого показателя за счет предъявления требований к стабильности влияющих параметров. При этом необходимо выполнить условия, чтобы  $K$  попадал в поле допуска. Только тогда датчик по данному свойству будет считаться работоспособным.

При проектировании ДУС, как правило, задается диапазон измерения входной величины угловой скорости и предельная относительная ошибка датчика. Методика расчета ДУС для заданного диапазона измерения предполагает сначала вычисление соответствующего значения номинальной крутизны статической характеристики  $K$ . Условие, определяющее коэффициент передачи датчика для заданного диапазона, имеет вид:

$$U_{\max} / f_{\max} = K, \quad (3)$$

где  $f_{\max}$  – верхнее предельное значение входного сигнала на заданном диапазоне измерения;  $U_{\max}$  – максимальное значение выходного сигнала в вольтах.

Далее на основании предъявления требований к предельно допустимой относительной ошибке датчика становится известным соответствующее абсолютное допустимое отклонение крутизны характеристики  $K$  относительно номинального значения:

$$\delta K = \Delta \cdot K, \quad (4)$$

где  $\Delta = \delta U_m / U_{\max}$  – предельно допустимая относительная ошибка датчика,  $\delta U_m$  – предельное отклонение выходного напряжения датчика на пределе измерения.

В предположении того, что ошибка датчика возникает только из-за  $j$ -го параметра, определим его предельно допустимое отклонение  $\delta(f_j)$  от номинального значения по формуле

$$\delta(f_j) = \Delta \cdot U_{\max} / \Psi_j. \quad (5)$$

Для анализа требований к параметрам датчика определим предельную абсолютную погрешность выходного сигнала датчика на границе диапазона измерения, учитывая влияние всех параметров одновременно, по линейному приближенному соотношению

$$\delta U_m = \sum_{j=1}^n \Psi_j \delta(f_j). \quad (6)$$

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

### Математическая модель датчика угловой скорости

Рассмотрим ДУС на основе вибрационного микрогироскопа  $LL$ -типа [4]. Принципиальная схема такого ДУС представлена на рис. 1. Датчик включает в себя чувствительный элемент (ЧЭ) из двух интегральных масс, выполненных в виде внутренней 1 и наружной 2 рамок. Внутренняя рамка 1 относительно внешней рамки 2 смонтирована на упругих подвесах 3, в свою очередь рамка 2 посредством упругих подвесов 4 связана с анкерами 5.

Анкеры обеспечивают зазор подвижного ЧЭ относительно подложки-основания. На основании принципа действия ДУС, как вибрационного гироскопа [5], внутренняя рамка 1 относительно внешней 2 посредством гребенок электростатического привода приводится в колебательное движение вдоль оси  $X$  (режим движения). Информация о параметрах колебаний считывается емкостными измерителями перемещений  $C_{пк}$  и используется в контуре управления режимом движения.

При воздействии угловой скорости  $\Omega_z$  обе рамки имеют колебательное движение по оси  $Y$  (на основании возникающего эффекта ускорения Кориолиса и соответствующей ему силы). Это режим чувствительности, который обеспечивается считыванием информации емкостными измерителями перемещений  $C_{сип}$ .

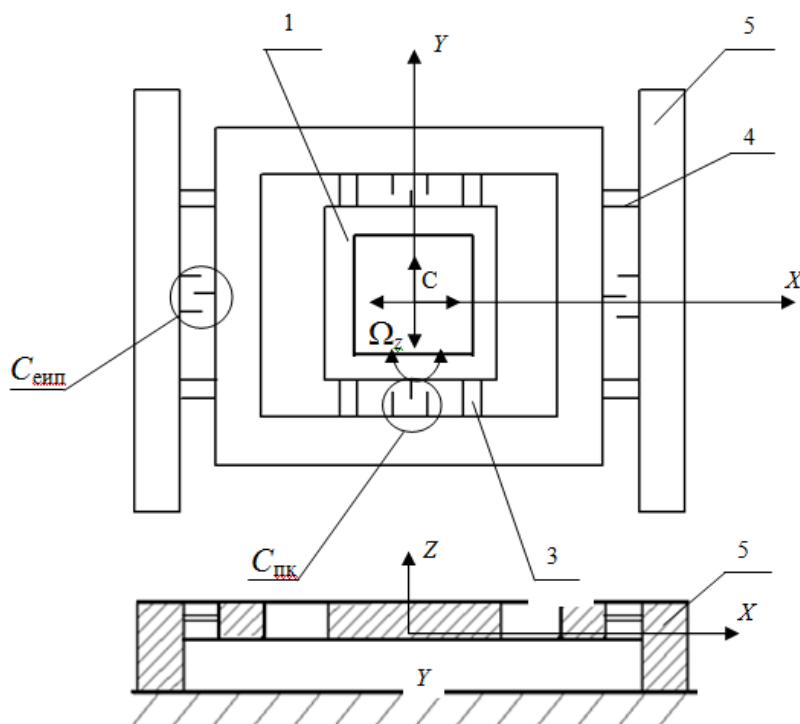


Рис. 1. Принципиальная схема чувствительного элемента ДУС

В результате воздействия входного сигнала ДУС  $\Omega_z$  обе рамки на основании эффекта прецессии выполняют движение вдоль оси  $Y$ . Емкостной измеритель перемещений (ЕИП) включен в дифференциальную мостовую схему, с которой высокочастотный сигнал масштабируется усилителем, в итоге на выходе микросхемы получается сигнал напряжения, пропорциональный угловой скорости. Оптимальный режим движения в режиме чувствительности обеспечивается электростатической обратной связью (ОС).

Дифференциальная мостовая схема включения емкостного преобразователя перемещений дает компенсацию влияния диэлектрической проницаемости среды между измерительными электродами и исключает методическую ошибку – тяжение между ними [5].

Для анализа работы ДУС в режиме динамики с целью оптимизации его динамических характеристик составлена структурная схема, которая представлена на рис. 2.

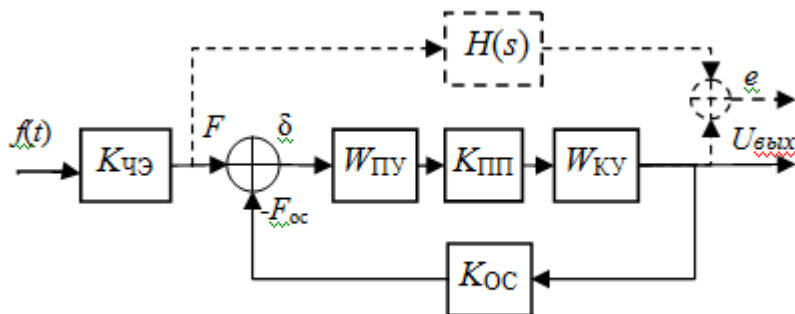


Рис. 2. Структурная схема ДУС:

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

Общая передаточная функция, согласно структурной схеме, вычисляется в виде

$$W(s) = K_{чэ} \frac{W_{пв} K_{пш} W_{кв}}{1 + W_{пв} K_{пш} W_{кв} K_{ос}}. \quad (7)$$

Основные математические модели чувствительного элемента, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи используются в соответствии с теоретическими положениями работ [3, 4].

Параметры электростатического возбудителя вибраций, передаточные функции чувствительного элемента и подвижного узла рассчитываются на основе конструкции аналогичной микрогироскопу *ADXRS* фирмы *Analog Device* [6].

Коэффициент передачи ЧЭ имеет вид:

$$K_{чэ}(s) = 2m\nu_x \cong 2mX_0\omega \quad (8)$$

где  $X_0$  – амплитуда колебаний в режиме движения подвижного узла;  $m$  – масса подвижного узла;  $\omega$  – резонансная частота.

Максимальное перемещение подвижного узла  $X_0$  при заданных параметрах упругого подвеса и электростатического преобразователя на резонансной частоте рассчитывается по формуле:

$$X_0 = A_{\max} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a_{мпв} b_{мпв} U_{оп}^2 a_{tx}^2 Q}{1 h E_{[100]} b_{tx} c_{tx}^3} \quad (9)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$  – соответственно диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость среды между электродами;  $E_{100}$  – модуль упругости кремния в плоскости 100;  $U_{оп}$  – опорное напряжение;  $h$  – величина зазора между пластинами конденсаторов;  $a_{мпв}$ ,  $b_{мпв}$  – длина и ширина подвижного узла;  $a_{tx}$ ,  $b_{tx}$ ,  $c_{tx}$  – длина, ширина и толщина торсиона внутренней рамки;  $Q$  – добротность колебательной системы.

Передаточная функция подвижного узла, как колебательного звена имеет вид:

$$W_{пв}(s) = \frac{1}{ms^2 + K_{д}s + G_y} \quad (10)$$

где  $G_y = E_{[100]} b_{ty} c_{ty}^3 / (16a_{ty}^3)$  – жесткость торсионов, работающих на изгиб в направлении оси  $Y$ ;  $K_{д}$  – коэффициент демпфирования.

Абсолютный коэффициент демпфирования для колебательных систем в зависимости от массы подвижного узла и жесткости упругих подвесов определяется в виде:

$$K_{д} = \sqrt{2mG_y} \quad (11)$$

Коэффициент передачи емкостного преобразователя перемещений имеет вид:

$$K_{пш} = \frac{U_{он} Q}{h} \quad (12)$$

Коэффициент передачи звена электростатической обратной связи имеет вид:

$$K_{ос} = 2\varepsilon_0 \varepsilon l_k b_k U_{он} / h^2, \quad (13)$$

где  $l_k$ ,  $b_k$  – длина и ширина электрода обратной связи.

### Методика расчета основных характеристик ДУС

С целью расчета конструктивных параметров ДУС и передаточных функций в программной среде *Matlab* разработана программа-функция  $[Z, W_{пу}, W_{че}, W_{бе}, W] = dus(P)$ , входными данными которой является вектор параметров  $P$  (подвижного узла, блока электроники, конструкции):

$$P = [Ar1, Adop, Bdop, h, Aco, Bo, Abo, Ayo, C, Dr2, Lr2, lk, bk, Atx, Btx, Aty, Bty, Ctx, Cty, Ky, Uop, T],$$

где в соответствии с конструкцией ЧЭ микрогироскопа [6] обозначено:  $Ar1$  – длина стороны внутренней рамки;  $Adop$  – длина дополнительной части внутренней рамки;  $Bdop$  – ширина дополнительной части внутренней рамки;  $h$  – величина зазора между пластинами конденсаторов (в программе  $dy0$ );  $Aco$  – длина центрального окна;  $Bo$  – ширина окон;  $Abo$  – длина бокового окна;  $Ayo$  – длина углового окна;  $C$  – толщина подвижного элемента;  $Dr2$  – ширина внешней рамки;  $Lr2$  – длина стороны внешней рамки;  $lk$  – длина пальца конденсатора чувствительности;  $bk$  – ширина пальца конденсатора чувствительности;  $Atx$  – длина торсиона внутренней рамки;  $Btx$  – ширина торсиона внутренней рамки;  $Ctx$  – толщина торсиона внутренней рамки;  $Aty$  – длина торсиона внешней рамки;  $Bty$  – ширина торсиона внешней рамки;  $Cty$  – толщина торсиона внешней рамки.

Дополнительно введены обозначения:  $Ky$  – коэффициент усилителя мощности,  $Uop$  – опорное напряжение,  $T$  – постоянная времени блока электроники.

Выходными параметрами программы-функции являются передаточные функции:

$Wpu$  – подвижного узла;  $Wche$  – чувствительного элемента;  $Wbe$  – блока электроники;  $W$  – полная передаточная функция ДУС и вектор расчетных параметров ДУС:

$$Z=[m,w,Gy,Koc,K],$$

где  $m$  – масса чувствительного элемента;  $w$  – круговая частота электростатического привода;  $Gy$  – жесткость одного торсиона внешней рамки;  $Koc$  – коэффициент обратной связи;  $K$  – коэффициент передачи датчика.

Текст программы-функции  $dus(P)$  на языке *Matlab* составлен в соответствии с теоретическими формулами механики, формулами для расчета коэффициента чувствительного элемента, первичного преобразователя, датчика обратной связи [3, 4], формулами для вычисления передаточных функций. Примеры такого рода программ приводились в работах [2, 5].

Использование программы-функции  $dus(P)$  осуществляется путем предварительного задания входных данных – вектора параметров  $P$ . Все исходные параметры ЧЭ, необходимые для расчета сведены в файл *input.dat* текстового формата *ascii*. Для расчета выходных параметров выполняется вызов  $dus(P)$  из управляющей программы *control\_dus*:

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

```
P=Po;
```

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

При расчете параметров  $Ctx$ ,  $Cty$ , определяющих диапазон измерения датчика, сначала рассчитывается коэффициент передачи датчика  $K$ , соответствующий диапазону измерения (3), и подбираются численные значения  $Ctx$ ,  $Cty$ , удовлетворяющие этому диапазону.

**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  $\pm 150$  град/с

Параметр	$Kche$	$m$ , кг	$w$ , рад/с	$Gy$	$Koc$	$K$	$Kpp$	$Uop$ , В	$Umax$ , 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	$Wmax$	$Atx$	$Btx$	$Ctx$	$Aty$	$Bty$	$Cty$	$lk$	$bk$	
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.

Таблица 2

Передаточные функции ДУС, соответствующие структурной схеме рис. 2

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

Далее решая задачу обоснования требований к параметрам ДУС необходимо определить коэффициенты чувствительности параметров (вектора параметров  $P$ ), на основной показатель качества – крутизну статической характеристики  $K$ . Используем стандартную формулу чувствительности (2) с учетом (1).

Вариация  $\delta f_j$   $j$ -го параметра задается относительно номинального значения параметра  $f_j$ , соответствующего заданному диапазону измерения датчика. Вариация  $\delta f_j$  производится в пределах стандартного 5% допуска на исходные параметры по равномерному закону распределения. Проводятся многочисленные испытания, в которых фиксируются как вариации  $\delta f_j$ , так и соответствующие изменения крутизны. Оценка коэффициента чувствительности  $j$ -го параметра производится на основе среднестатистического значения (3).

На основе метода статистического моделирования составлена управляющая программа *dus\_kj.m* для расчета коэффициентов чувствительности параметров, текст которой представлен далее:

```
Po=load('input.dat'); % ввод исходных данных
[Z,Wpu,Wche,Wbe,W]= dus(Po); % расчет параметров ДУС для номинальных значений
Po
K=dcgain(W); % крутизна статической характеристики для заданного диапазона
% Вычисление Ko(k) – крутизны при вариации s(k) j-го параметра
j=1;
while j<23
P= Po; an(j)=P(j); k=1;
while k<1000 % задание цикла в 1000 статистических испытаний
P(j)=0.95*an(j)+0.1*an(j)*rand(1,1); % вариация j-го параметра
[Z,Wpu,Wche,Wbe,W]= dus(P); % вычисление параметров ДУС
Ko(k)=dcgain(W); s(k)=P(j); % запоминание K и j-го параметра в массив
e(k)=Ko(k)-K; e1(k)=s(k)-Po(j); % расчет отклонений
kjk(k)= e(k)/e1(k); % коэффициент влияния j-го параметра в k-м испытании
k=k+1; end
kj(j)=mean(kjk); % среднее значение коэффициента влияния j-го параметра
j=j+1; end
save('result2.txt','P','kj','-ascii') % запись результатов в текстовый файл.
```

Эта программа вызывает подпрограмму-функцию  $dus(P)$ , предназначенную для расчета параметров ДУС. При использовании *dus\_kj.m* по формуле найдены коэффициенты чувствительности (коэффициенты влияния) параметров  $f_i$  ДПИ на выходную характеристику  $K$  (3). Были получены результаты по коэффициентам влияния  $\Psi_j$  и допускам  $\delta_j$  на параметры для различных предельных погрешностей датчика. Результаты для различных предельных погрешностей датчика (0,1 % погрешность и 1 % погрешность) сведены в табл. 3.

Анализ результатов табл. 3 показал, что при 1% предельной погрешности датчика предъявляются вполне реальные требования по стабильности параметров. Особые требова-

ния на уровне  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  м предъявляются только к параметрам торсионов внутренней рамки по ширине и толщине.

Таблица 3

Коэффициенты чувствительности  $\Psi_j$  и допуски  $\delta_i$  параметров

Параметр $f_i$	Статистический номинал $f_i$	$\Psi_j = \delta K / \delta f_i$	$\delta_i$ (при 0,1% точности)	$\delta_i$ (при 1% точности)
$P(1)=Ar1$	$1.5e-3$	$5.5504687e+3$	$1.0809898e-6$	$1.0780415e-5$
$P(2)=Adop$	$1.215e-4$	$2.9833036e+2$	$2.0111933e-5$	$2.0111949e-4$
$P(3)=Bdop$	$8.1e-5$	$4.4750308e+2$	$1.3407729e-5$	$1.3407685e-4$
$P(4)=h$	$2.0e-5$	$1.1458764e+5$	$5.2361667e-8$	$5.2361667e-7$
$P(5)=Aco$	$1.242e-3$	$-7.9524027e+2$	$-7.5448896e-6$	$-7.5400269e-5$
$P(6)=Bo$	$2.16e-4$	$-8.5489977e+3$	$-7.0183666e-7$	$-7.0180283e-6$
$P(7)=Abo$	$8.1e-4$	$-7.9576011e+2$	$-7.5399607e-6$	$-7.5427061e-5$
$P(8)=Ayo$	$1.35e-4$	$-1.5911840e+3$	$-3.7707770e-6$	$-3.7704028e-5$
$P(9)=C$	$7,238e-5$	$1.5812170e+4$	$3.7945457e-7$	$3.7773373e-6$
$P(10)=Dr2$	$1.9e-4$	$6.1885089e+3$	$9.6953889e-7$	$9.6953889e-6$
$P(11)=Lr2$	$1.62e-3$	$7.2581277e+2$	$8.2665947e-6$	$8.2665947e-5$
$P(12)=lk$	$1e-4$	$-2.2845917e+4$	$-2.6262899e-7$	$-2.6217972e-6$
$P(13)=bk$	$1e-5$	$-2.3344354e+5$	$-2.5702146e-8$	$-2.6181010e-7$
$P(14)=Atx$	$3,24e-4$	$1.0750782e+4$	$5.5809893e-7$	$5.5643837e-6$
$P(15)=Btx$	$1e-5$	$-1.1013787e+5$	$-5.4477174e-8$	$-5.4691715e-7$
$P(16)=Aty$	$1.0e-4$	$3.8200672e+1$	$1.5706530e-4$	$1.5706530e-3$
$P(17)=Bty$	$1e-5$	$3.8200672e+2$	$1.5706530e-5$	$1.5706530e-4$
$P(18)=Ctx$	$2e-6$	$-1.7396985e+6$	$-3.4488735e-9$	$-3.5071179e-8$
$P(19)=Cty$	$2.0e-6$	$3.6232268e-9$	$1.6559824e+6$	$-2.1959583e+7$
$P(20)=Ku$	$9.0e+4$	$2.3614328e-20$	$2.5408303e+17$	$-6.9695992e+017$
$P(21)=Uop$	$2.0e+1$	$1.1458764e-1$	$5.2361667e-2$	$5.2361667e-1$

## Определение параметров корректирующего устройства

В структурной схеме датчика (см. рис. 2) для улучшения динамических свойств датчика предусмотрено корректирующее устройство с передаточной функцией  $W_{ку}$ , соответствующей ПИД регулятору.

$$W_{ку}(s) = T_1 s + T_2 + T_3 / s, \quad (15)$$

где  $T_1, T_2, T_3$ , – постоянные времени корректирующего устройства.

Такое КУ в микроакселерометре впервые было применено в работе [1], далее обсуждались особенности выбора его параметров в работах [2, 7]. В работе [2], с помощью данного КУ, была показана возможность достижения малой колебательности переходного процесса или даже обеспечения его затухания по апериодическому закону с достаточно малым временем. В работе [2] также показана возможность достижения малых значений динамической ошибки СКО при работе микроакселерометра с применением ПИД КУ (на уровне  $10^{-7}$ , что для подобных приборов достаточно неплохой показатель).

При использовании ПИД корректирующего устройства в ДУС необходимо продолжить исследование его положительных свойств и определить достижимость наибольшей динамической точности датчика в зависимости от параметров КУ. В работе [7] утверждается, что с целью синхронизации работы узлов микросистемного датчика коэффициенты ПИД КУ должны быть одинаковыми, но доказательство этого утверждения не приводится. Очевидно, что при равенстве коэффициентов  $T_1, T_2, T_3$  важные качества переходного процесса датчика получатся далеко не оптимальными.

Для достижения удовлетворительного качества переходного процесса необходимо внести в модель прямой цепи датчика ограничения на параметры КУ.

Запишем передаточную функцию прямой цепи в соответствии со структурной схемой рис. 2 на основании (7) с учетом передаточной функции КУ (15).

$$W_{\text{пр}}(s) = W_{\text{пу}} K_{\text{пп}} W_{\text{ку}} = \frac{1}{Js^2 + K_{\text{дв}}s + G_y} K_{\text{пп}} \left( T_1 s + T_2 + \frac{T_3}{s} \right). \quad (16)$$

Используя эту передаточную функцию можно получить необходимые и достаточные условия для получения графика переходного процесса с малой колебательностью (или вообще с отсутствием таковой).

Наиболее очевидным и простым решением является подбор параметров КУ таким образом, чтобы нули КУ совпали с полюсами подвижного узла. При этом необходимо выполнить условия:  $T_2/T_1 = K_{\text{дв}}/J$ ,  $T_3/T_1 = G_y/J$  и тогда скобки  $(s^2 + T_2/T_1 s + T_3/T_1)$  и  $(s^2 + K_{\text{дв}}/J s + G_y/J)$  сокращаются. В результате из (17) получим более простое выражение для передаточной функции прямой цепи.

$$W_{\text{пр}}(s) = K_{\text{пп}} T_1 / (J \cdot s). \quad (17)$$

Полная передаточная функция замкнутой системы (датчика) с учетом коэффициента передачи чувствительного элемента и обратной связи на основании (7) имеет вид:

$$W(s) = K_{\text{чэ}} \frac{K_{\text{пп}} T_1 / (J \cdot s)}{1 + K_{\text{ос}} K_{\text{пп}} T_1 / (J \cdot s)} = \frac{K_{\text{чэ}}}{K_{\text{ос}}} \frac{1}{J (K_{\text{ос}} K_{\text{пп}} T_1)^{-1} s + 1}. \quad (18)$$

Обозначая  $K_{\text{ку}} = T_1/J$ , как коэффициент передачи КУ, а  $T_0 = (K_{\text{пп}} K_{\text{ос}} K_{\text{ку}})^{-1}$  – как постоянную времени датчика, получим передаточную функцию замкнутой системы в виде:

$$W(s) = \frac{K_{\text{чэ}}}{K_{\text{ос}}} \frac{1}{T_0 s + 1}. \quad (19)$$

Из теории известно, что полученной передаточной функции датчика соответствует полоса пропускания равная  $\omega_0 = 1/T_0$ , и время переходного процесса равно  $t_{\text{пп}} = 3 \cdot T_0$ . Реализация  $T_0$  при ранее вычисленных параметрах  $K_{\text{пп}}$ ,  $K_{\text{ос}}$  возможна только за счет  $T_1$ . Параметр  $T_1$  определяет эффективность действия дифференцирующей составляющей КУ. Другие параметры  $T_2$ ,  $T_3$  оказываются тесно связанными с  $T_1$  соотношениями:  $T_2 = T_1 \cdot K_{\text{дв}}/J$ ,  $T_3 = T_1 \cdot G_y/J$  (в отличие от работы [7], где  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  предполагались равными).

### Моделирование ДУС в *Matlab Simulink*

С целью реального исследования работоспособности ДУС и проверки его характеристик создана адекватная модель в визуальной среде *Matlab Simulink* [8] при реализации рассчитанных ранее параметров.

Схема моделирования ДУС в *Matlab Simulink* представлена на рис. 3. Схема предусматривает вычисление ошибки отработки входного скачкообразного сигнала структурой ДУС. Причем при дальнейшей, уже программной обработке массива ошибок, полученных в блоке *e*, рассчитывается экспериментальное значение среднего квадрата ошибки.

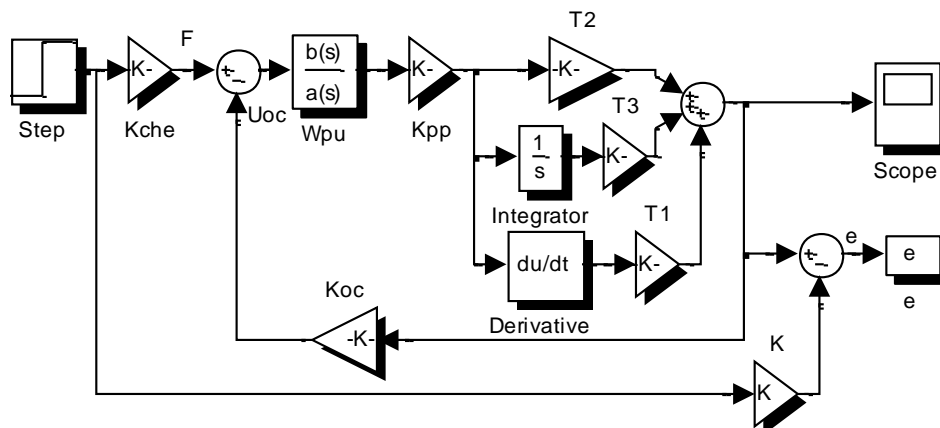
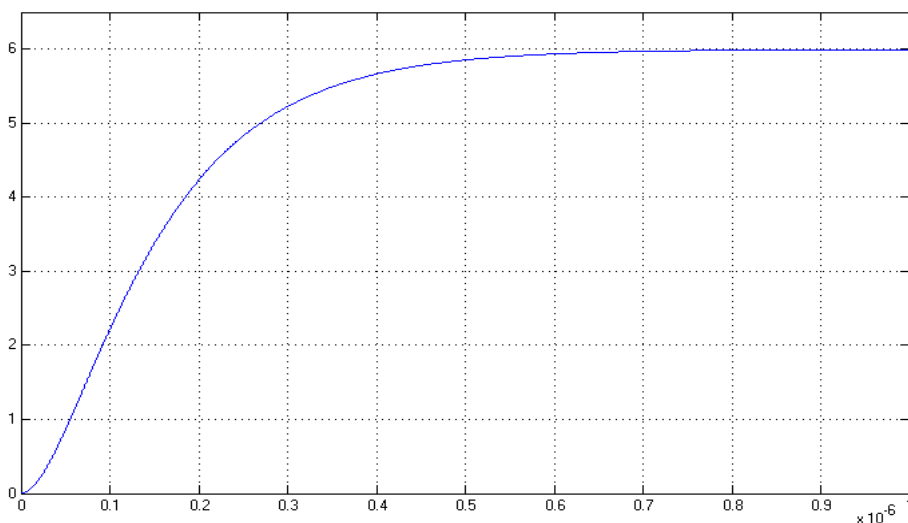


Рис. 3. Схема моделирования ДУС в *Matlab Simulink*



При моделировании получен график переходного процесса при максимальном входном сигнале 150 град/с (см. рис. 4), показывающий аperiodичность достижения максимального выходного сигнала 6 В за время примерно  $7 \cdot 10^{-7}$  с.



**Рис. 4. Переходный процесс датчика**

На основе моделирования по схеме 3 произведена оценка СКО, результаты которой для данного примера соответствуют минимальному значению:  $\text{СКО} = 3,58 \cdot 10^{-6}$ .

### Выводы

В данной работе выявлены параметры МЭМС компенсационного ДУС, наиболее сильно влияющие на основную характеристику ДУС – крутизну статической характеристики, сформулированы требования к электромеханическим параметрам ДУС по критерию статической точности, разработана методика расчета статических и динамических характеристик ДУС для заданного диапазона измерений.

Одним из теоретических результатов в данной работе является доказательство возможности получения динамической характеристики микродатчика с апериодическим переходным процессом с достаточно малым временем переходного процесса ( $t_{\text{ПП}} = 3 \cdot T_0$ , где постоянная времени  $T_0$  теоретически может быть выбрана сколь угодно малой).

Практическим результатом является построение методики расчета датчика с учетом коэффициентов влияния конструктивных и электрических параметров на крутизну статической характеристики и на качество динамики. Методика позволяет в автоматическом режиме рассчитать ДУС практически на любой реальный диапазон измерения.

### 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. **Вавилов, В.Д.** Теоретические основы микросистемных акселерометров и гироскопов / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – 210 с.
4. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

5. **Вавилов, В.Д.** Компьютерное моделирование характеристик микросистемных датчиков / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2007. – 80 с.
6. **Шахнович, И.** МЭМС гироскопы – единство выбора. Электроника НТБ. 2007. № 1. С. 76–85.
7. **Вавилов, В.Д.** Оптимизация характеристик микроакселерометра со смещенной осью качания маятника // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2012. № 2 (95). С. 309–318.
8. **Дьяконов, В.П.** Simulink 5/6/7: самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.

*Дата поступления  
в редакцию 12.04.2013*

**V.L. Volkov, M.V. Chrisanova**

## **VI. PROVISION STEADY-STATE AND DYNAMIC ACCURACY OF THE MICRO ELECTROMECHANIC SENSOR OF ANGULAR VELOCITY**

Arzamas polytechnical institute (branch) Nizhny Novgorod state technical universiy  
n.a. R.Y. Alexeev

**Purpose:** Making methods of calculation to accuracy micro electro mechanic sensor on base of analysis of influence constructive parameter on steepness of steady-state feature.

**Design/methodology/approach:** is Formed mathematical model of micro sensor of angular velocity (DUS) on base principle functioning the micro gyroscope LL-type. The Considered methods of calculation of main features DUS on base of programming in ambience Matlab. The Considered method of modeling DUS for reason statistical discovery factor of influence constructive parameter on steepness of steady-state feature.

**Findings:** is Presented results of model test DUS in the manner of tables factor to sensitivity parameter and graphics to connecting function. On graph is shown achievement it is enough small time of connecting process of sensor. Will Revealed dominant parameters, defining instability of steepness of steady-state feature of sensor. They Are Determined optimum parameters, corresponding to minimum dynamic mistake of sensor.

**Research limitations/implications:** Using the offered methods of calculation of features DUS gives the minimum fair square-law of mistake of sensor for given a range of measurement.

**Originality/value:** On base of considered methods of designing and studies DUS is worded requirements to electro mechanic parameter MEMS sensor on criterion steady-state and dynamic accuracy.

*Key words:* MEMS, sensor of angular velocity, steady-state feature, accuracy, sensitivity, average square of mistake, modeling.