

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ. СИНТЕЗ И АНАЛИЗ

МИХАЙЛОВ П.Г.

Профессор кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского, г. Пенза тел. 89273788810, pit_mix@mail.ru,

ЗЛАТОГОРСКИЙ М.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского. zma199@yandex.ru;

КЛЕЙМЕНОВ Ю.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского yusef.k.a@mail.ru;

ВЕРЕВКА А.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского king_of_cross@mail.ru;

УСАЧЕВ А.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского andreu.us17@gmail.com.

Аннотация Статья посвящена вопросам моделирования элементов и структур датчиков физических величин информационных систем. Математическое моделирование в настоящее время является обязательной процедурой при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию новых образцов компонентов информационно-измерительных систем (ИИС), в частности, датчиков физических величин. Одной из разновидностей математических моделей датчиков неэлектрических величин являются информационные модели. На стадиях разработки информационных моделей определяют соотношения между входными и выходными информационными потоками с учетом воздействия внешних факторов (помех). В информационном плане датчик как устройство для приема, преобразования и передачи измерительной информации представлен в виде «черного ящика», на вход которого поступает неэлектрический сигнал, а снимается выходной – электрический сигнал. Подробно рассмотрены структурные математические модели одноканальных и двухканальных датчиков. Примером одноканальной модели может служить мостовая схема, питаемая постоянным напряжением, в которой выходное напряжение зависит от давления и температуры. Показано, что экспериментально определяя передаточные коэффициенты и функции влияния, и подставляя их в разработанные аналитические математические модели, получают численные математические модели. Кроме того, при этом используют справочные материалы по датчикам, где приведены функции и коэффициенты влияния, характеристики и величины воздействующих факторов. Проведен расчет и анализ передаточных характеристик и сделаны выводы.

Ключевые слова: информация; модель; датчик; физическая; величина; система.

Введение Математическое моделирование в настоящее время является обязательной процедурой при проведении научно-исследовательских и опытно-

конструкторских работ по созданию новых образцов компонентов информационно-измерительных систем (ИИС), в частности, ДФВ [1, 2]. Одной из разновидностей ММ ДФВ являются информационные модели.

Основная часть. Следует отметить, что процесс создания моделей МЭД ФВ характеризуется значительной сложностью, так как многие явления, происходящие в микрообъеме и на поверхности МЭД ФВ, не имеют аналогов в массивных материалах. Кроме того, формализация явлений в интегральных элементах сопряжена с необходимостью привлечения различных теорий и законов, характерных для физики твердого тела, физической химии, тензорного анализа, теории вероятности и проч. В итоге, из-за разнородного масштаба анализируемых элементов и структур, а также из-за различия в математических аппаратах их описания, невозможно проводить синтез сквозных моделей МЭД ФВ, поэтому предлагается разрабатывать «уровневые» модели МЭД ФВ [1].

Согласно данной концепции низовым уровнем компонентов МЭД ФВ является уровень монокристалла для монокристаллических полупроводников и отдельного зерна или домена для поликристаллических и аморфных материалов. При этом именно низовой уровень в микроэлектронных компонентах датчиков определяет большинство их ЭФХ [2].

Рассмотрим один из уровней указанной композиции компонентов, а именно, уровень чувствительного элемента и всего датчика в целом, который может моделироваться особым классом информационных ММ - структурных ММ [3].

На стадиях разработки информационных моделей (далее – модели) определяют соотношения между входными и выходными информационными потоками с учетом воздействия внешних факторов (помех).

В информационном плане датчик как устройство для приема, преобразования и передачи измерительной информации можно представить в виде «черного ящика», на вход которого поступает сигнал $\bar{X}$, а снимается выходной сигнал - $\bar{Y}$ [3].

Структурная схема датчика может быть представлена в виде обобщенной модели, приведенной на рис. 1, где X_i – массив состояния объекта измерения, a_j – элемент массива, F – функция преобразования, Z – влияющие величины (ВВ).

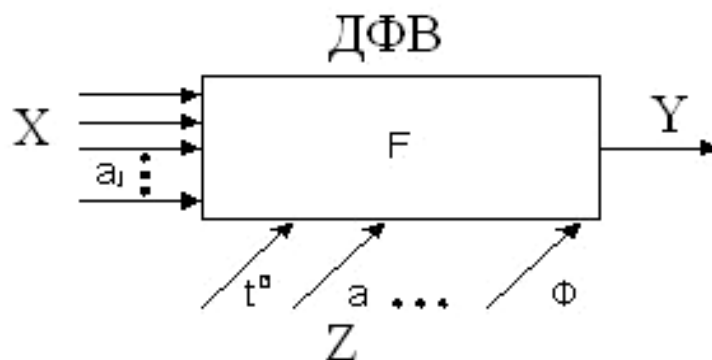


Рис. 1. Структурная модель датчика.

В общем случае $\bar{Y}$ является вектором в $m \times h \times l$ – мерном пространстве. В большинстве случаев для полупроводниковых датчиков давления, $\bar{Y}$ зависит в основном от составляющих: давления, температуры, поэтому для данного случая могут быть рассмотрены упрощенные модели [2]:

1. Одноканальная, когда на выходе датчика – один сигнал, являющийся суммой «чистого» сигнала, помехи и перекрестных сигналов - рис. 2.
2. Двухканальная – на выходе присутствуют два сигнала, несущих информацию о температуре и давлении - рис. 3.

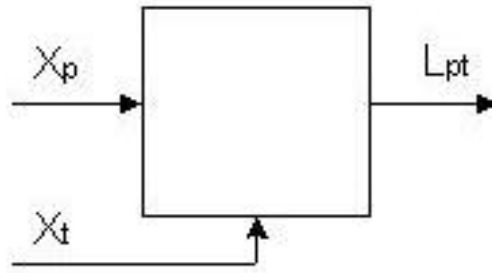


Рис. 2. Одноканальная модель датчика.

Для одноканальной модели преобразование $\bar{X} \rightarrow L_{pt}$ выглядит следующим образом:

$$L_{pt} = \alpha X_p + \beta X_t + (\gamma X_p) \cdot X_t + (\nu X_t) \cdot X_p = \alpha X_p + \beta X_t + (\gamma + \nu) X_p \cdot X_t = \alpha X_p + \beta X_t + S X_p \cdot X_t = L_p + L_t + \ddot{L}_{pt} \quad (1)$$

Примером одноканальной модели может служить мостовая схема, питаемая постоянным напряжением, в которой выходное напряжение зависит от P_x и t_x : $U_{\text{вых}} = F(P_x, t_x)$.

Одноканальные модели, в отличие от двухканальных, в литературе рассмотрены достаточно широко, поэтому более подробно рассмотрим именно последние.

Для обобщенной двухканальной модели датчика формулы преобразования могут быть представлены:

$$\begin{aligned} Y_{pt} &= \alpha X_p + \beta X_t + \gamma X_p \cdot X_t \\ Z_{tp} &= \nu X_t + \lambda X_p + \rho X_t \cdot X_p \end{aligned} \quad (2)$$

или

$$\begin{aligned} Y_{pt} &= Y_p + \Pi t + \Pi_{pt} \\ Z_{tp} &= Z_t + \Pi p + \Pi_{pt} \end{aligned} \quad (3)$$

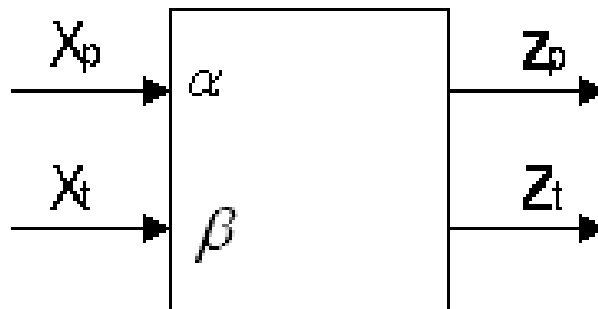


Рис. 3. Обобщенная модель двухканального датчика

Уточненная модель двухканального датчика представлена на рис. 4, где изображены передаточные звенья датчика.

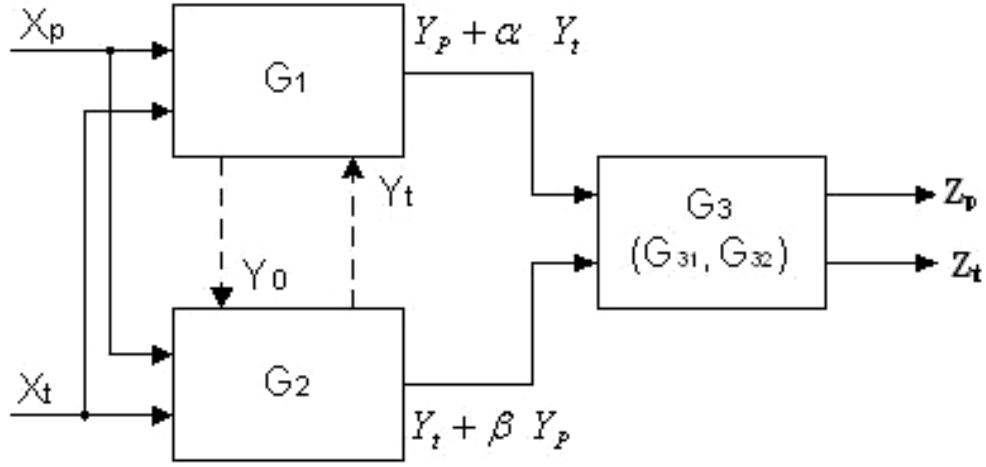


Рис. 4. Уточненная модель двухканального датчика.

Передаточные характеристики звеньев:

$$G_1 = \frac{Y_p + \alpha Y_t}{X_p + X_t} = \frac{Y_p + \alpha Y_t}{X_{pt}} \quad (4)$$

$$G_2 = \frac{Y_t + \beta Y_p}{X_p + X_t} = \frac{Y_t + \beta Y_p}{X_{pt}} \quad (5)$$

$$G_{31} = \frac{Z_p + \gamma Z_t}{Y_p + \alpha Y_t} = \frac{Z_p + \gamma Z_t}{G_1 X_{pt}} \quad (6)$$

$$G_{32} = \frac{Z_t + \nu Z_p}{Y_t + \beta Y_p} = \frac{Z_t + \nu Z_p}{G_2 X_{pt}} \quad (7)$$

откуда:

$$Z_p = \frac{G_{31}(Y_p + \alpha Y_t) + \gamma G_{32}(Y_t + \beta Y_p)}{1 - \nu\gamma} \quad (8)$$

$$Z_t = G_{32}(Y_t + \beta Y_p) - \frac{\nu[G_{31}(Y_p + \alpha Y_t) - \gamma G_{32}(Y_t + \beta Y_p)]}{1 - \nu\gamma} \quad (9)$$

Выражая X_p и Y_p через X_{pt} (бинарная переменная), получаем:

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{1}{1 - \nu\gamma} G_{31} \left[\frac{X_{pt}(G_1 - \alpha G_2)}{1 - \alpha\beta} + \frac{\alpha X_{pt}}{1 - \alpha\beta} (G_2 - \beta G_1) \right] - \\ &\quad - \left\{ \frac{\gamma G_{32}}{1 - \nu\gamma} \left[\frac{X_{pt}}{1 - \alpha\beta} (G_2 - \beta G_1) + \frac{\beta X_{pt}(G_1 - \alpha G_2)}{1 - \alpha\beta} \right] \right\} = \\ &= X_{pt} \frac{1}{(1 - \nu\gamma)(1 - \alpha\beta)} [G_{31}(G_1 - \alpha G_2 - \alpha\beta G_1) - \gamma G_{32}(G_2 - \beta G_1 + \beta\alpha G_2)] \\ &= X_{pt} \frac{G_{31}G_1\gamma G_{32}G_2}{1 - \nu\gamma} \end{aligned} \quad (10)$$

аналогично для Z_t :

$$\begin{aligned} Z_t &= G_{32} X_{pt} \left(\frac{G_2 - \beta G_1}{1 - \alpha\beta} + \frac{\beta G_1 - \alpha\beta G_2}{1 - \alpha\beta} \right) - \frac{\nu}{1 - \nu} \left\{ G_{31} \left[X_{pt} \frac{(G_1 - \alpha G_2)}{1 - \alpha\beta} + \alpha X_{pt} \frac{G_2 - \beta G_1}{1 - \alpha\beta} \right] - \right. \\ &\quad \left. - \gamma G_{32} \left[X_{pt} \frac{G_2 - \beta G_1}{1 - \alpha\beta} + \beta X_{pt} \frac{G_1 - \alpha G_2}{1 - \alpha\beta} \right] \right\} = \\ &= X_{pt} \left[G_{32}G_2(1 - \gamma) - G_{31}G_1 \frac{\nu}{1 - \nu\gamma} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, для двухканального датчика информационную модель можно представить в виде математических выражений (10) и (11).

Следует отметить, что ММ (10) и (11) содержат в своем составе мультипликативные составляющие, которые и определяют их существенную нелинейность.

Переходя от структурных моделей к полиномиальным, для двухканальных датчиков можно выразить выходные сигналы:

-сигнал канала давления

$$U_p(P, T) = A_0(T) + A_1(T) \cdot P + A_2(T) \cdot P^2, \quad (12)$$

где A_0 - напряжение при нулевом давлении ($P=0$), A_1 , A_2 -коэффициенты чувствительности датчика к давлению зависящие от температуры.

-сигнал канала температуры

$$U_T(T, P) = B_0(P) + B_1(P) \cdot T + B_2(P) \cdot T^2 + B_3(P) \cdot T^3 + \dots, \quad (13)$$

где B_0 - напряжение при реперной температуре ($T=20^0C$), B_1 , B_2 , B_3 -коэффициенты чувствительности датчика к температуре, зависящие от давления.

С математической точки зрения выделение сигналов давления и температуры сводится к решению уравнений (12 и 13). Зависимости коэффициентов чувствительности $A_i(T)$ и $B_j(P)$ можно представить полиномами, коэффициенты которых находятся известными методами, например методом наименьших квадратов.

Экспериментально определяя передаточные коэффициенты и функции влияния, и подставляя их в указанные соотношения, переходят к численным моделям. Кроме того, используют справочные материалы по датчикам, где приведены функции и коэффициенты влияния, характеристики и величины воздействующих факторов [4-7].

В качестве примера использования структурных ММ, на рис. 5 приведена схема тензорезисторного МЭД давления и температуры [8]. Обратные связи, идущие от мостовой схемы и от схемы компенсации, являются стабилизирующими и служат для компенсации температурного дрейфа нулевого уровня и чувствительности.

В состав совмещенного датчика, выполненного по классической одноканальной схеме, входят термочувствительные элементы, которые совместно с другими ЧЭ образуют цепи термозависимых обратных связей, компенсирующих влияние температуры на характеристики МЭД, а также измеряющих температуру основного компонента датчика - чувствительного элемента.

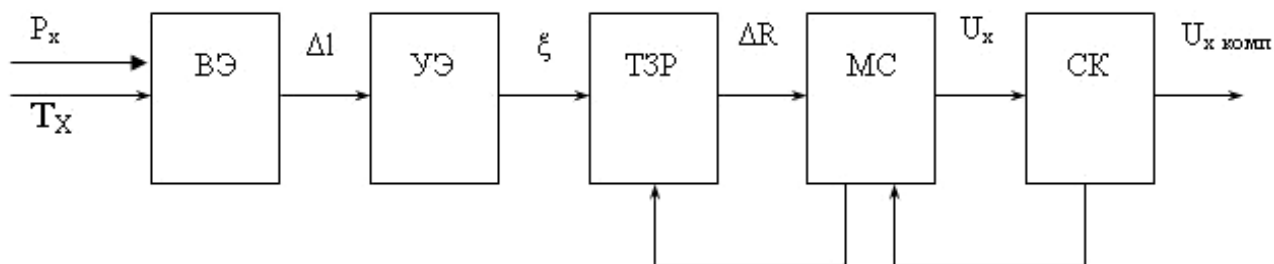


Рис. 5. Структурная модель тензорезисторного совмещенного МЭД давления и температуры: ВЭ – воспринимающий элемент; УЭ – упругий элемент; ТЗР – тензорезистор; МС – мостовая схема; СК – схема компенсации; P_x -давление; T_x -температура; Δl -прогиб; ξ -деформация; ΔR -изменение сопротивления тензорезисторов; U_x -выходное напряжение с мостовой схемы; $U_{x\text{комп}}$ - скопенсированное по температуре выходное напряжение с датчика.

Заключение Проанализированы разновидности математических моделей датчиков - информационные модели, которые позволяют оптимизировать конструкцию датчиков, оценить точность и взаимовлияние каналов для многоканальных датчиков. Получены математические модели для одноканальных и двухканальных датчиков. Приведены примеры функциональных схем совмещенных датчиков давления и температуры.

Список литературы

1. Ожикенов К.А., Михайлов П.Г. и др. Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков. // Вестник НАН Республики Казахстан № 6 2014. С. 27-34
2. Михайлов П.Г., Ожикенов К.А., Айтимов М.Ж. и др. Информационно-энергетические модели датчиков физических величин. Синтез и оптимизация // Сборник трудов МНТК «Информационно-вычислительные системы и математическое моделирование в решении задач строительства, техники, образования и управления». Пенза, ПГУАС 2013. С. 264-268.
3. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968.
4. Михайлов П.Г. Микромеханические устройства и приборы. Учебное пособие / Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007. 174 с.
5. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник под ред. Е.Е. Багдатьяна, А.В. Гориша, Я.В. Малкова. / М.: ИПРЖР, 1998.
6. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / М.: Техносфера, 2005. 592 с.
7. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 147 с.
8. Михайлов П.Г. Микроэлектронный датчик давления и температуры // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. № 11 2003 С. 29-31.

MICROMECHANICAL TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF MEASURING TRANSDUCERS OF INFORMATION SYSTEMS

MIKHAILOV P.G.

Professor of the department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky, city of Penza tel. 89273788810, pit_mix@mail.ru,

ZLATOGORSKY M.

Graduate of the department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky. zma199@yandex.ru;

KLEIMMEN Y.

Master of the Department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky yusef.k.a@mail.ru;

VEREVKA A.

Master of the Department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky king_of_cross@mail.ru;

USACHEV A.

Master of the department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky andrey.us17@gmail.com.

Abstract The article is devoted to the form-forming processes used in the manufacture of micromechanical sensors of physical quantities for information systems. Various methods and technologies for the formation of silicon sensitive elements (CHE) of sensors are described.

When forming volumetric elements and structures of micromechanical devices (MMUs), in particular, sensitive elements of measuring converters (PI), several methods are used, the action of which is based on the removal of the material. At the same time, combining certain of them, one

can obtain a wide variety of forms of MMUs. These methods include: 1 group - liquid etchants (wet etching): anisotropic liquid etching in alkaline etchants; isotropic liquid etching in acidic etchants; electrochemical etching in electrolytes; 2nd group - gas etchants (dry etching): - gas etching in aggressive gases; ion etching using inert-gas ions accelerated by the electromagnetic field; plasma-chemical etching using plasma of reactive gases.

From this list, anisotropic liquid etching and, to a lesser extent, isotropic liquid and electrochemical etching have found the greatest application for shaping purposes. This is partly due to the fact that anisotropic and isotropic etching does not require, in contrast to plasmochemical and electrochemical, complex equipment and equipment.

The general problem of the formation of micromechanical elements (MME) by etching methods is considered: when forming parts from anisotropic materials (including monocrystalline silicon), in contrast to isotropic, the need to take into account not only the chemical composition and the state of the etchant (temperature, concentration) but also the anisotropy process of etching.

Key words: micromechanics; etching; anisotropic; isotropic; gas; liquid

Bibliography

1. Mikhailov P.G. Formation of sensory elements and structures of microelectronic sensors // New industrial technologies. 2004-No. 2 P. 67-69.
2. Raspopov, V. Ya. Micromechanical Devices: Textbook. Manual / M.: Mechanical Engineering, 2007. - 400 p.
3. Mikhailov P.G. Form-forming processes for creating micromechanical devices // Microsystem technique. 2003-No. 7-C. 10-13.
4. Mikhailov P.G. Mokrov E.A. Control of microstructures of semiconductor sensors of physical quantities // Izvestiya Southern Federal University. Technical science. No. 3 (164) 2015 pp. 175-184.
5. Gotra Z.Yu. Technology of microelectronic devices. Handbook - M.: Radio and Communication, 1991.
6. Mikhailov PG, Tsibizov PN Modification of materials of microelectronic sensors // New industrial technologies. 2003-No. 6 pp. 65-68.
7. Mikhailov PG, Sergeev DA, Sokolov AV High-temperature functional materials for sensors of physical quantities. tr. I Int. scientific and practical conf. "Innovative technologies in the machine-building complex" Penza Izd-vo PGU. 2012 pp. 289 -291.
8. Mikhailov PG, Mikhailov AP Materials of microelectronic sensors // New industrial technologies. M, 2003 - № 3 pp. 19-21.
9. Modification and doping of a surface by laser, ionic and electron fluxes, Ed. J. Pauti / M: Mechanical Engineering 1987.
10. Mikhailov PG, Tsibizov PN Form-forming technologies in micromechanical devices // University Education: Collection of Materials of the VIII International Scientific and Methodical Conference. -Penza: PDNTP, 2004 C. 230-23
11. Mikhailov PG, Tsibizov PN Technology of Formation in Micromechanics University Education: // Proceedings of the VIII International Scientific and Methodical Conference. -Penza: PDNTP, 2004, pp. 232-234.
12. Vaganov, V.I. Integral transducers / M.: Energoatomizdat, 1983. 136 p.
13. Gridchin, VA, Dragunov VP / Physics of microsystems: Textbook. allowance; in 2 hours Part 1 / Novosibirsk: Publishing House of the National Technical University, 2004. - 416 p.
14. Mikhailov P.G. Micromechanical devices and devices. Tutorial. / Penza: Information and Publishing Center of the PGU, 2007 174 p.
15. Microelectromechanical sensors. MEMS Mechanical Sensors / Stephen Beeby / Graham Ensell, Michael Kraft and Heil White.15 2004. Eng.