

**АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПОЗИЦИОННОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОПТРОННЫХ СТРУКТУРАХ**

© 2008 С. А. Матюнин, М. В. Степанов

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье рассматриваются вопросы расчета погрешности нелинейности позиционной характеристики МОС-датчика перемещения

*Датчик перемещения, многокомпонентные оптронные структуры, позиционная характеристика, погрешность нелинейности, синтез конструкции*

Создание помехоустойчивых бесконтактных датчиков перемещения, работающих в жестких условиях эксплуатации, является актуальной проблемой во многих отраслях приборостроения. Большую долю таких преобразователей составляют оптические датчики, использующие различные способы преобразования и кодирования информации. Одним из указанных видов являются датчики перемещения, в которых используется эффект спектрального преобразования. Как показано в [1], применяя этот эффект, можно создавать устойчивые к внешним воздействиям датчики перемещений на многокомпонентных оптронных структурах (МОС-датчики) с высокими метрологическими характеристиками.

Одним из важных параметров датчика перемещений является погрешность нелинейности его позиционной характеристики (ПХ).

В данной работе производится расчет погрешности нелинейности позиционной характеристики МОС-датчика перемещений.

Известно [1, 2], что позиционную характеристику такого датчика можно описать выражением

$$I(j) = \frac{1}{2} \Phi_m T_m^1 T_m^2 S_m \sqrt{\frac{p}{C}} \text{Exp} \left( \frac{A(j)^2}{C} - B(j) \right) \quad (1)$$

где  $C = K^\Phi + K^{T1} + K^{T2} + K^S$ ;

$$A(j) = K^\Phi I^\Phi + K^{T1} (I^{T1} - dl(j)) + K^{T2} I^{T2} + K^S I^S;$$

$$B(j) = K^\Phi I^{\Phi^2} + K^{T1} (I^{T1} + dl(j))^2 + K^{T2} I^{T2^2} + K^S I^{S^2};$$

$$dl(j) = I_{mT1} \text{Cos}(j_0) (\text{Sin}(j) \text{Tg}(j_0) + \text{Cos}(j) - 1)$$

– приращение максимума спектральной характеристики пропускания подвижного спектроформирующего элемента (СФЭ) в зависимости от его угла поворота;  $j_0$  – начальный угол падения излучения на СФЭ;  $K^\Phi, K^{T1}, K^{T2}, K^S$  – коэффициенты, определяющие ширину полос излучения, пропускания подвижного и неподвижного СФЭ и чувствительность приемника излучения соответственно;  $I^\Phi, I^{T1}, I^{T2}, I^S$  – длины волн максимумов их спектральных характеристик.

Абсолютное отклонение позиционной характеристики (1) от линейной равно

$$\Delta(j) = J_{\text{лин}}(j) - J(j), \quad (2)$$

где  $J_{\text{лин}}(j) = C_0 + C_1 j$  – линейная аппроксимация ПХ.

При этом коэффициенты  $C_0, C_1$  можно определить по критерию минимальной квадратичной погрешности:

$$\int_{j_{\text{мин}}}^{j_{\text{макс}}} \left( C_0 + C_1 j - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{p}{C}} \text{Exp} \left( \frac{A(j)^2}{C} - B(j) \right) \right)^2 \rightarrow \text{min}. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов  $C_0, C_1$  воспользуемся методом наименьших квадратов:

$$\sum_{i=0}^N (C_0 + C_1 j_i - J_i(j_i))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Здесь  $N$  – количество точек, полученных при дискретизации ПХ.

Дифференцируя выражение (4) по  $C_0$  и  $C_1$  и приравнявая значения частных производных к нулю, получим систему

$$\begin{cases} \tilde{N}_1 \sum_{i=0}^N j_i + N C_0 = \sum_{i=0}^N J_i(j_i), \\ N C_1 \sum_{i=0}^N j_i^2 + C_0 \sum_{i=0}^N j_i = N \sum_{i=0}^N j_i J_i(j_i). \end{cases} \quad (5)$$

Учитывая, что рабочий диапазон перемещения датчика симметричен относительно нуля ( $\pm j_{\max}$ ) и  $\sum_{i=0}^N j_i = 0$ , получим систему уравнений вида

$$\begin{cases} N C_0 = \sum_{i=0}^N J_i(j_i), \\ N C_1 \sum_{i=0}^N j_i^2 = N \sum_{i=0}^N j_i J_i(j_i). \end{cases} \quad (6)$$

Тогда величины коэффициентов  $C_0, C_1$  определяются:

$$\begin{cases} \tilde{N}_0 = \frac{\sum_{i=0}^N J_i(j_i)}{N}, \\ C_1 = \frac{N \sum_{i=0}^N j_i J_i(j_i)}{N \sum_{i=0}^N j_i^2}. \end{cases} \quad (7)$$

При  $N \rightarrow \infty$  получим

$$\begin{cases} C_0 = \frac{1}{2j_{\max}} \int_{-j_{\max}}^{j_{\max}} J(j) dj, \\ C_1 = \frac{\int_{-j_{\max}}^{j_{\max}} j J(j) dj}{\frac{8}{3} j_{\max}^3 - j_{\max}^2}. \end{cases} \quad (8)$$

График ПХ датчика и его линейная аппроксимация изображены на рис. 1.

Из анализа формулы (1) и рис. 1 можно сделать вывод, что позиционная характеристика МОС-датчика имеет форму кривой Га-

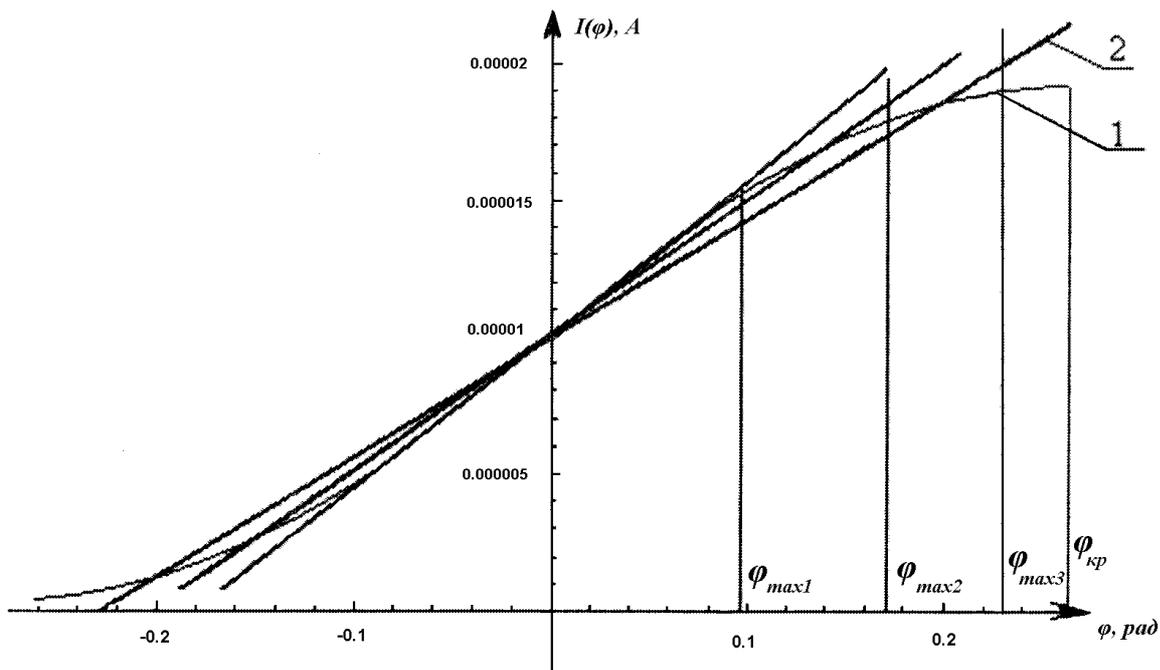


Рис. 1. Позиционная характеристика датчика (кривая 1), линейная аппроксимация позиционной характеристики (кривая 2)

усса. Следовательно, существует некоторое критическое значение диапазона перемещения  $j_{кр}$ , совпадающее с максимумом ПХ.

Кроме того, при увеличении диапазона перемещения  $j_{max}$  погрешность нелинейности ПХ датчика увеличивается, а чувствительность уменьшается. Чувствительность определяется тангенсом угла наклона ПХ к оси абсцисс  $a = C_1$ .

При фиксированном диапазоне перемещения чувствительность датчика будет максимальной, если  $j_{max}$  совпадает с критическим значением  $j_{кр}$  (рис. 1).

Таким образом, задача синтеза конструкции МОС-датчика перемещения является многокритериальной.

Рассмотрим особенности методики синтеза МОС-датчика по критериям максимальной чувствительности и минимальной погрешности нелинейности.

При синтезе конструкции по критерию максимальной чувствительности коэффициенты линейной аппроксимации ПХ рассчитываются по формуле (8), а относительная приведённая погрешность нелинейности ПХ и чувствительность датчика определяются из условий

$$d(j) = \frac{|J(j) - (C_0 + C_1 j)|}{\max |J(j)|} = \frac{|J(j) - (C_0 + C_1 j)|}{\sup\{|J(j_{max})|, |J(j_{min})|\}} \leq d_{\text{дир}}; \quad (9)$$

$$\tilde{N}_1(A, B, C) \rightarrow \max.$$

График зависимости относительной приведённой погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения представлен на рис. 2.

При синтезе конструкции по критерию минимальной погрешности нелинейности ПХ значение границы рабочего диапазона  $a_{max}$  гораздо меньше критического значения  $j_{кр}$ .

Условие оптимизации параметров МОС-датчика при таком расчёте:

$$d(j) \rightarrow \min;$$

$$C_1(A, B, C) \geq C_{100\%}. \quad (10)$$

Из рис. 1 видно, что чувствительность датчика  $a$  и угол наклона линейной ПХ практически не зависят от  $j_{max}$ . Тогда с некоторой погрешностью величину чувствительности датчика можно определить из выражения

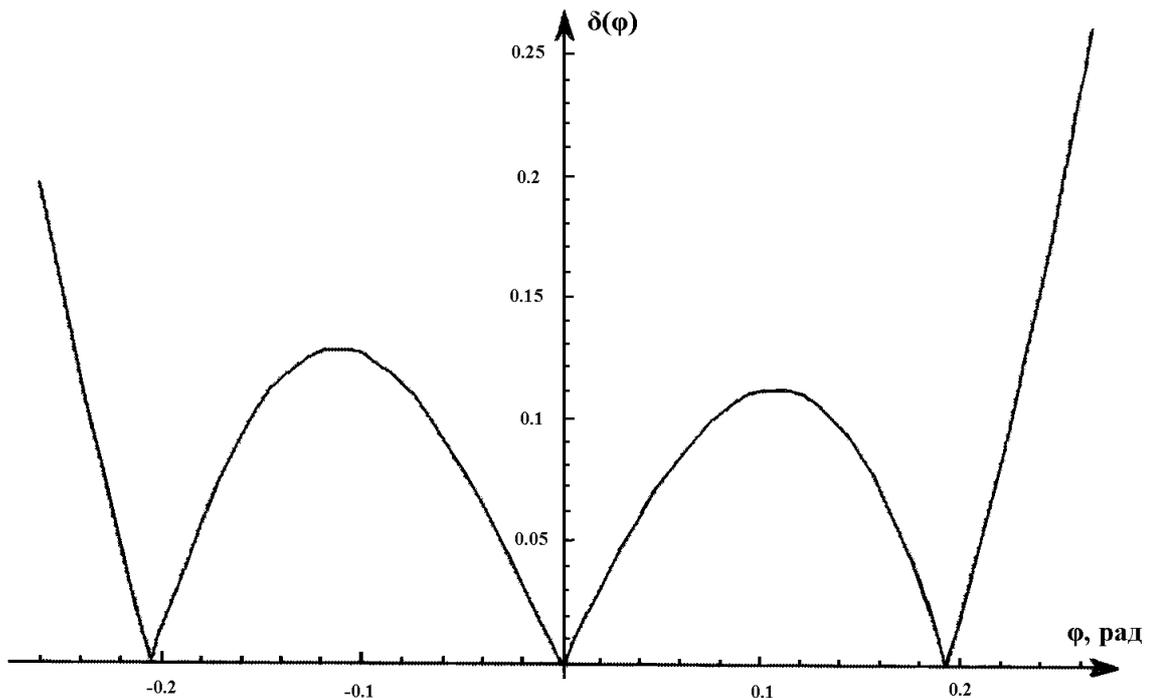


Рис. 2. График зависимости относительной приведённой погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения

$$a = \frac{dJ(j)}{dj} \Big|_{j=0} = \frac{1}{2} \Phi_m T_m^1 T_m^2 S_m \text{Exp} \left( \frac{A(j=0)^2}{C} - B(j=0) \right) \sqrt{\frac{P}{C}} \times$$

$$\times \left( K^{T1} (I^{T1})^2 T g(j_0) - \frac{2(K^\Phi I^\Phi + K^{T1} I^{T1} + K^{T2} I^{T2} + K^S I^S) K^{T1} I^{T1} T g(j_0)}{C} \right) =$$

$$= J(0) * F. \tag{11}$$

В этом случае из (2) получим

$$J_{\text{лин}}(j) = J(0) + J(0) * F * j. \tag{12}$$

С учётом (11) приведённая погрешность нелинейности ПХ определяется:

$$d(j) = \frac{|J(j) - J_{\text{эи}}(j)|}{\max |J(j)|} =$$

$$= \frac{|J(j) - (J(0) + J(0) * F * j)|}{\sup\{|J(j_{\text{max}})|, |J(j_{\text{min}})|\}}. \tag{13}$$

График зависимости приведённой погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения представлен на рис. 3.

Поскольку линейная аппроксимация ПХ в данном случае представляет собой ка-

сательную в точке  $j = 0$ , то максимальное значение погрешности нелинейности достигается на границе диапазона измерения и равна

$$d(j) = \frac{|J(j) - J_{\text{эи}}(j_{\text{max}})|}{|J(j_{\text{max}})|} =$$

$$= \frac{|J(j) - (J(0) + J(0) * F * j_{\text{max}})|}{|J(j_{\text{max}})|}. \tag{14}$$

Итак, при синтезе конструкции МОС-датчика перемещения необходимо оптимизировать ряд его параметров, в частности:

- длины волн максимумов спектральных характеристик пропускания СФЭ  $I^{T1}, I^{T2}$ ;
- полосы пропускания СФЭ  $\Delta I^{T1}, \Delta I^{T2}$ ;
- начальный угол падения излучения на СФЭ  $j_0$ .

Рассмотренные выше методики дают возможность перейти от частных критериев оптимизации к общему и создать обобщённую методику расчёта и оптимизации параметров МОС-датчика перемещения.

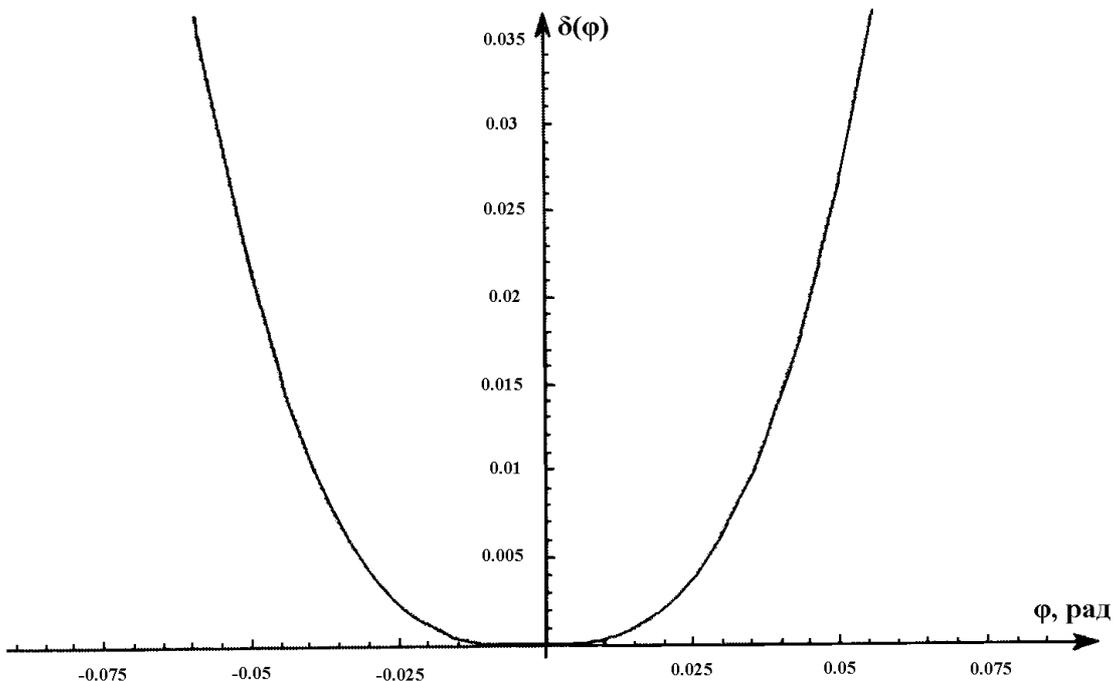


Рис. 3. График зависимости приведенной погрешности нелинейности ПХ от угла перемещения

### Библиографический список

1. Матюнин, С. А. Многокомпонентные оптронные структуры [Текст] / С. А. Матюнин. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2001. – 260 с. – ISBN 5-93424-040-4.
2. Матюнин, С. А. и др. Аппроксимация спектральных характеристик элементов многокомпонентных оптронных структур функциями Гаусса // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета [Текст] / С. А. Матюнин, А. Б. Борисов, М. Ю. Иноземцев. – 2001. – Вып. 5 – С. 76–82. – Библиогр. : С. 82.

### References

1. Matyunin, S. A. Multicomponent optronic structures. / S. A. Matyunin. – Samara: Samara scientific centre of the Russian Academy of Sciences, 2001. – 260 pp. – ISBN 5-93424-040-4.
2. Matyunin, S. A. et al. Approximation of spectral characteristics of multicomponent optronic structure elements by Gaussian functions // Vestnik of Samara State Aerospace University / S. A. Matyunin, A. B. Borisov, M. Yu. Inosemtsev. – 2001. – Issue 5. – pp. 76-82. – Bibliogr.: p. 82.

## ANALYSIS OF THE ERROR OF NON-LINEARITY OF POSITIONAL CHARACTERISTICS OF A DISPLACEMENT TRANSDUCER ON MULTICOMPONENT OPTRONIC STRUCTURES

© 2008 S. A. Matyunin, M. V. Stepanov

Samara State Aerospace University

The paper deals with calculating the error of non-linearity of positional characteristics of a displacement transducer on multicomponent optronic structures.

*Displacement transducer, multicomponent optronic structures, positional characteristics, error of non-linearity, construction synthesis*

### Информация об авторах

**Матюнин Сергей Александрович**, заведующий кафедрой электронных систем и устройств, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: информационно-измерительные системы и устройства, автоматизация технологических процессов.

**Степанов Максим Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры электронных систем и устройств. Место работы: ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

**Matynin, Sergey Alexandrovitch**, head of the department of electronic systems and devices, doctor of technical science, professor. Area of research: information measurement systems and devices, automation of technological processes.

**Stepanov, Maxim Vladimirovitch**, senior research officer, candidate of technical science, department of electronic systems and devices. Place of work: State Research-and-Production Space Rocket Centre “CSDB-Progress”. Area of research: element and devices of computational equipment and control systems.