

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.317.3

А. В. Майоров, А. В. Светлов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ПОГРЕШНОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ СИЛЫ ОТ ПРИЛОЖЕННОЙ НАГРУЗКИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются датчики силы на основе тензорезистивных мостов. Предметом исследования является зависимость погрешности функции преобразования тензорезистивных датчиков силы от величины приложенной нагрузки. Цель работы – создание математической модели, описывающей зависимость погрешности выходного сигнала тензорезистивного датчика силы от приложенной нагрузки.

Материалы и методы. Предложенная математическая модель зависимости погрешности выходного сигнала тензорезистивных датчиков силы от приложенной нагрузки построена на основе интерполяционного многочлена Лагранжа.

Результаты. Предложена математическая модель, описывающая зависимость погрешности преобразования выходного сигнала от приложенного давления для тензорезистивных датчиков силы, имеющих различные значения максимальной нагрузки. Предложенная математическая модель является степенным полиномом, построенным на основе интерполяционного многочлена Лагранжа, и позволяет учесть зависимость погрешности выходного сигнала тензорезистивных датчиков силы от приложенной нагрузки при цифровой обработке информации.

Выводы. Применение предложенной модели зависимости погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки тензорезистивных датчиков силы позволяет учесть нелинейность функции преобразования датчиков силы во всем диапазоне нагрузок. Благодаря этому возможно снижение основной погрешности информационно-измерительных систем, использующих датчики силы. При этом для использования предложенной математической модели не требуется точного снятия зависимости выходного сигнала от приложенной нагрузки во всем диапазоне нагрузок, что значительно упрощает процесс наладки систем с использованием датчиков силы.

Ключевые слова: датчик силы, основная погрешность, информационно-измерительная система, цифровая обработка сигналов, математическая модель.

A. V. Mayorov, A. V. Svetlov

A MATHEMATICAL MODEL OF THE DEPENDENCE OF THE OUTPUT SIGNAL ERROR OF PIEZORESISTIVE FORCE SENSORS ON THE APPLIED LOAD

Abstract.

Background. The research object is the force sensors based on piezoresistive bridges. The subject is the dependence of the transformation function error of piezoresistive force sensors on the applied load value. The aim of the study is to create a mathematical model describing the dependence of the output signal error of piezoresistive force sensor on the applied load.

Materials and methods. The suggested mathematical model of the dependence of the output signal error of piezoresistive force sensors on the applied loads is based on the Lagrange interpolation polynomial.

Results. The authors suggested the mathematical model describing the dependence of the output signal conversion error on the applied pressure for piezoresistive force sensors with different values of the maximum load. The proposed mathematical model is a power polynomial, built on the basis of the Lagrange interpolation polynomial, and allows to take into account the dependence of the output signal error of piezoresistive force sensors on the applied loads at digital data processing.

Conclusions. Application of the proposed model of the dependence of the output signal error on the applied load of piezoresistive force sensors allows to take into account the nonlinearity of the conversion function of the force sensors in the entire load range. This allows to reduce the basic error of IMS-based force sensors. Application of the proposed mathematical model does not require to precisely take the dependence of the output signal on the applied load throughout the range of loads that greatly simplifies the process of setting up systems using force sensors.

Key words: pressure sensor, main error, information-measuring system, digital signal processing, mathematical model.

В настоящее время существует проблема построения высокоточных датчиков силы, имеющих низкую основную погрешность. Основная погрешность большинства существующих датчиков силы на основе тензорезистивного моста находится в диапазоне значений 0,5...1 % от номинального значения. При этом характеристика функции преобразования датчика силы имеет ярко выраженную нелинейность в первой половине шкалы, что в некоторых случаях недопустимо [1]. В первую очередь это касается высокоточных интеллектуальных информационно-измерительных систем (ИИС), предназначенных для работы на космических аппаратах (КА), системах выведения КА, авиационной технике. Поэтому задача коррекции нелинейности функции преобразования датчиков силы является актуальной.

Одним из способов снижения нелинейности функции преобразования датчиков давления резистивного типа является хранение в памяти микроконтроллера таблицы коэффициентов коррекции с последующим расчетом промежуточных узлов методом кусочно-линейной интерполяции. Еще одним способом является аппроксимация реальной функции преобразования прямой линией, значения начала и конца которой совпадают со значениями реальной функции преобразования при нулевом давлении и при номинальном (максимальном) давлении. К недостаткам первого способа следует отнести необходимость использования большого объема постоянного запоминающего устройства микроконтроллера для хранения матрицы коэффициентов, а также значительную методическую погрешность ввиду невозможности проведения эксперимента для определения точной передаточной функции каждого конкретного датчика. К недостаткам второго способа – высокую методиче-

скую погрешность (до 1 %) ввиду отсутствия коррекции нелинейности функции преобразования датчика [2].

При этом одной из основных проблем, связанных с повышением точности тензорезистивных датчиков силы, является отсутствие математической модели, описывающей зависимость выходного сигнала датчика силы от приложенной нагрузки и учитывающей нелинейность функции преобразования.

Авторами проведена серия экспериментов по определению зависимости выходного сигнала тензорезистивных датчиков силы от приложенной нагрузки. При проведении эксперимента использованы тензорезистивные датчики на основе тензорезисторов типа 1-LY41-6/350 [3]. Тензорезисторы были соединены в мост по два последовательно соединенных тензорезистора в каждом из плеч моста. В два плеча моста последовательно с тензорезисторами также включены постоянные подборочные компенсационные резисторы для реализации термокомпенсации тензорезистивного моста при работе в широком диапазоне температур. Эскиз схемы электрической принципиальной, поясняющей принцип соединения тензорезисторов, приведен на рис. 1.

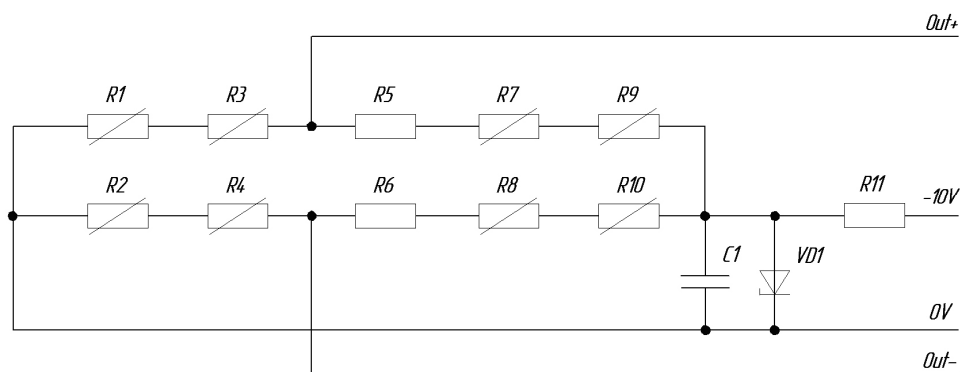


Рис. 1. Эскиз схемы электрической принципиальной, поясняющей принцип подключения тензорезистивного моста

Питание тензорезистивного моста осуществлялось от внешнего источника питания напряжением 10 В через параметрический стабилизатор на элементах R11, VD1, C1. В качестве VD1 применен прецизионный термокомпенсированный стабилитрон типа 2C198E [4], имеющий напряжение стабилизации 6,3 В. Конденсатор C1 является блокировочным и имеет емкость 0,1 мкФ, тип K10-17. Резистор R11 является токоограничительным, имеет сопротивление 4,07 кОм, тип C2-36. Измерение выходного напряжения тензорезистивного моста осуществлялось нановольт-микроомметром типа AGILENT TECHNOLOGIES 34420A [5].

Было проведено три серии экспериментов с датчиками силы на максимальную нагрузку 10, 50 и 100 тс. При проведении каждой серии экспериментов использовалось по четыре датчика силы каждого номинала. Для повышения достоверности результата измерение выходного сигнала датчиков силы производилось не ранее, чем через 15 с после задания нагрузки, количество измерений для каждой силы составляло не менее 10, после чего данные усреднялись. Ввиду того что функция зависимости выходного сигнала от нагрузки недостаточно наглядна из-за невозможности определения величины

погрешности по графику функции, использована зависимость погрешности выходного сигнала датчика силы от величины приложенной нагрузки. Полученные зависимости погрешности выходного сигнала датчиков силы на нагрузку 10, 50 и 100 тс от приложенной нагрузки представлены соответственно на рис. 2–4.

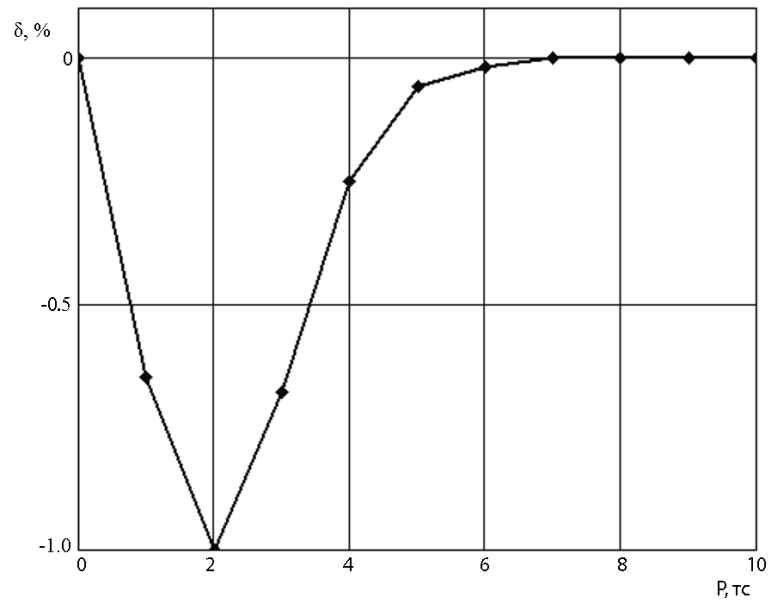


Рис. 2. Зависимость погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки датчика силы на номинальную нагрузку 10 тс

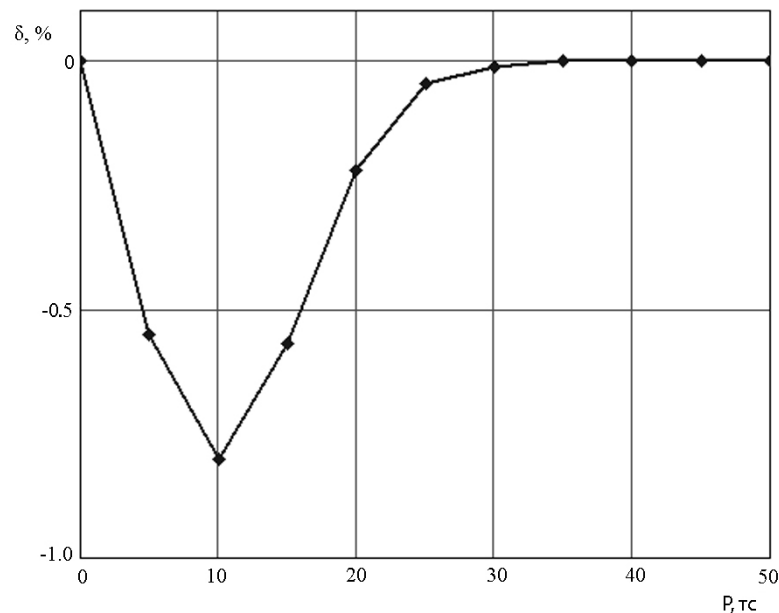


Рис. 3. Зависимость погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки датчика силы на номинальную нагрузку 50 тс

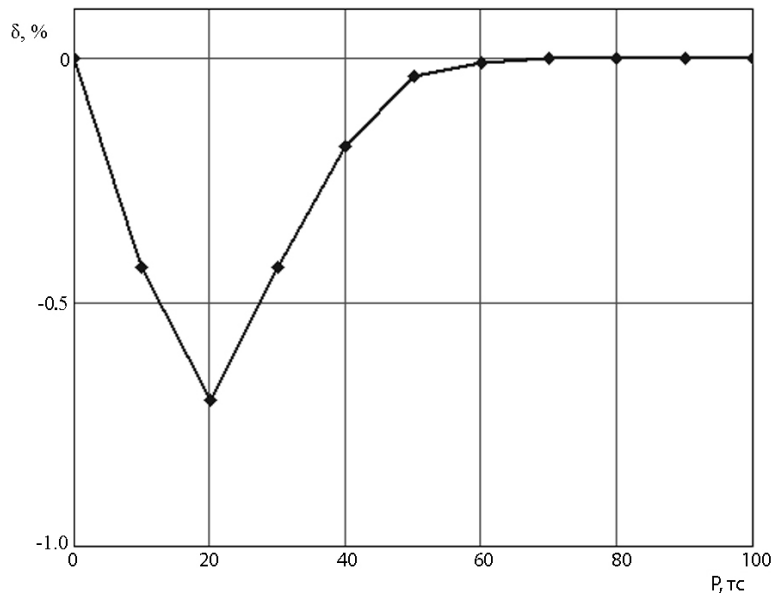


Рис. 4. Зависимость погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки датчика силы на номинальную нагрузку 100 тс

Из графиков, приведенных на рис. 2–4, видно, что датчики силы на основе тензорезистивных мостов имеют составляющую погрешности, обусловленную нелинейностью, до 1%. Наибольшая нелинейность наблюдается на первой половине функции преобразования. Максимальное значение погрешности, обусловленной нелинейностью зависимости выходного сигнала от приложенного давления, приходится на диапазон нагрузок от 17 до 22 % от номинальной нагрузки. Кроме того, из графиков, приведенных на рис. 2–4, видно, что датчики на различные диапазоны нагрузок имеют схожие зависимости погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки.

Для реализации возможности коррекции погрешности преобразования тензорезистивных датчиков силы в составе информационно-измерительной системы была создана математическая модель зависимости погрешности выходного сигнала датчика силы от приложенной нагрузки.

Ввиду того что функция преобразования непериодична, является монотонно возрастающей (см. рис. 1), использование разложения функции в гармонический ряд, в том числе разложение в ряд Фурье, нецелесообразно, так как полученная математическая модель будет иметь значительную погрешность на краях диапазона и не будет сходиться с исходной функцией в первоначально заданных узлах [6].

С учетом вышесказанного для создания математической модели был выбран интерполяционный многочлен Лагранжа [6, 7]:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) l_i(x), \quad (1)$$

где $L_n(x)$ – искомая функция; $f(x_i)$ – значения исходной функции в заданных узлах; x_i – значения аргумента в заданных узлах; $l_i(x)$ – базисные полиномы.

Базисные полиномы интерполяционного многочлена Лагранжа определяются следующим образом:

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}. \quad (2)$$

Для расчета коэффициентов базисных полиномов были использованы значения функции преобразования тензорезистивных датчиков, имеющих диапазон нагрузок 10 тс. В работе [6] установлено, что при использовании интерполяционного многочлена Лагранжа оптимальное количество узлов (с точки зрения величины погрешности между исходными узлами) находится в диапазоне от 10 до 25.

При проведении эксперимента с достаточно высокой точностью (относительная погрешность не более 0,01 %) и доверительной вероятностью 0,995 возможно определение 11 точек, включая границы диапазона. При этом получены значения погрешности функции преобразования, соответствующие значениям нагрузки в диапазоне от 0 до 10 тс с равномерным шагом в 1 тс.

В связи с тем, что значения выходного сигнала, соответствующие значениям нагрузки 0 и 10 тс, являются основополагающими при расчете погрешности выходного сигнала датчика, так как они определяют начальное смещение выходного сигнала (при нагрузке 0 тс) и коэффициент преобразования, погрешность выходного сигнала датчика силы при указанных значениях нагрузки можно принять равной нулю. В ходе эксперимента установлено, что значения погрешности выходного сигнала датчика, соответствующие значениям нагрузки 7, 8, 9 тс, в условиях проведенного эксперимента пренебрежимо малы ($f(x) \ll 0,01 \%$), следовательно, в данном случае их также можно принять равными нулю. Исходя из того, что в формуле (1) происходит перемножение базисных полиномов на значения исходной функции в узлах, логично предположить, что производить расчет базисных полиномов для вышеуказанных значений нагрузки не имеет смысла, так как при подстановке (2) в (1) они будут обращены в нуль.

В соответствии с вышеизложенным были определены базисные полиномы $l_1(x)$, $l_2(x)$, $l_3(x)$, $l_4(x)$, $l_5(x)$, $l_6(x)$ интерполяционного многочлена Лагранжа, соответствующие значениям нагрузки в 1, 2, 3, 4, 5 и 6 тс, на основе формулы (2):

$$l_1(x) = \frac{x(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)(x-6)(x-7)(x-8)(x-9)(x-10)}{-9!}; \quad (3)$$

$$l_2(x) = \frac{x(x-1)(x-3)(x-4)(x-5)(x-6)(x-7)(x-8)(x-9)(x-10)}{2 \cdot 8!}; \quad (4)$$

$$l_3(x) = \frac{x(x-1)(x-2)(x-4)(x-5)(x-6)(x-7)(x-8)(x-9)(x-10)}{-3! \cdot 7!}; \quad (5)$$

$$l_4(x) = \frac{x(x-1)(x-2)(x-3)(x-5)(x-6)(x-7)(x-8)(x-9)(x-10)}{4! \cdot 6!}; \quad (6)$$

$$l_5(x) = \frac{x(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-6)(x-7)(x-8)(x-9)(x-10)}{-5! \cdot 5!}; \quad (7)$$

$$l_6(x) = \frac{x(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)(x-7)(x-8)(x-9)(x-10)}{6! \cdot 4!}. \quad (8)$$

После подстановки значений исходной функции в имеющихся узлах в формулу (1) получили:

$$L_n(x) = -0,65l_1(x) - 1l_2(x) - 0,68l_3(x) - 0,25l_4(x) - 0,06l_5(x) - 0,018l_6(x). \quad (9)$$

Проверка полученной степенной функции была проведена в среде MathCAD путем подстановки значений аргументов известных узлов. Проведенная проверка показала полное совпадение значений исходной и полученной функций в известных узлах. График полученной степенной функции, построенный в среде MathCAD на основе 101 узла, приведен на рис. 5.

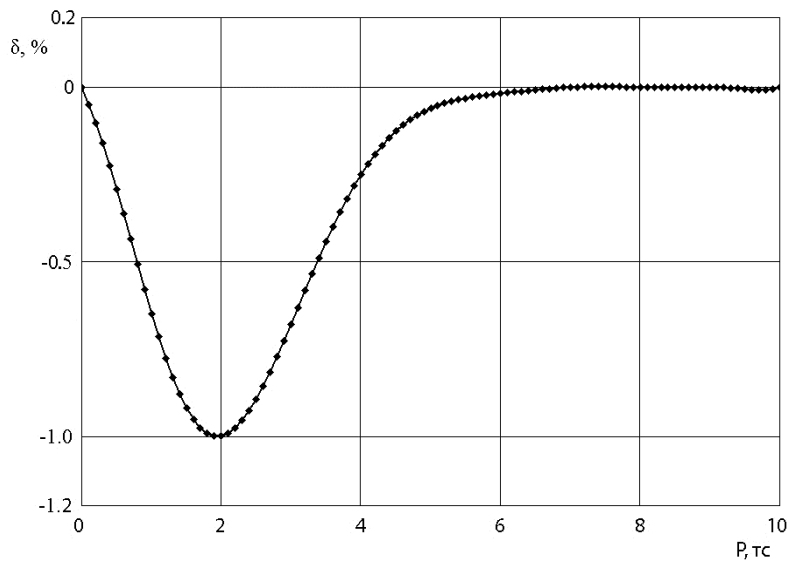


Рис. 5. График полученной степенной функции, описывающей зависимость значения погрешности преобразования от приложенной нагрузки для датчика с максимальной нагрузкой 10 тс

Анализ графиков, представленных на рис. 2–4, показывает, что зависимости погрешности выходного сигнала от нагрузки для датчиков с различными значениями максимальных нагрузок имеют схожие графики. С учетом этого на основе разработанной математической модели зависимости погрешности выходного сигнала от нагрузки датчика, имеющего значение максимальной нагрузки 10 тс, разработана универсальная математическая модель, позволяющая строить зависимости погрешности выходного сигнала тензорезистивного датчика силы от нагрузки для датчиков с различными значениями максимальной нагрузки.

Разработанная универсальная математическая модель зависимости погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки тензорезистивных датчиков силы имеет следующий вид:

$$L_n(x) = \frac{\delta_m}{1,538} l_1(x) + \delta_m l_2(x) + \frac{\delta_m}{1,47} l_3(x) +$$

$$+ \frac{\delta_m}{4} l_4(x) + \frac{\delta_m}{16,67} l_5(x) + \frac{\delta_m}{55,6} l_6(x), \quad (10)$$

где δ_m – максимальное значение погрешности, соответствующее значению нагрузки датчика силы, равному 20 % от максимальной нагрузки; x – величина приложенной нагрузки; $l_1(x)$, $l_2(x)$, $l_3(x)$, $l_4(x)$, $l_5(x)$, $l_6(x)$ – базисные полиномы интерполяционного многочлена Лагранжа, определяются по формулам:

$$l_1(x) = \frac{1}{-P_m^{10} 9!} x(x-2P_m)(x-3P_m)(x-4P_m)(x-5P_m) \times \\ \times (x-6P_m)(x-7P_m)(x-8P_m)(x-9P_m)(x-10P_m),$$

где P_m – максимальная нагрузка датчика;

$$l_2(x) = \frac{1}{P_m^{10} 2! 8!} x(x-1P_m)(x-3P_m)(x-4P_m)(x-5P_m) \times \\ \times (x-6P_m)(x-7P_m)(x-8P_m)(x-9P_m)(x-10P_m);$$

$$l_3(x) = \frac{1}{-P_m^{10} 3! 7!} x(x-1P_m)(x-2P_m)(x-4P_m)(x-5P_m) \times \\ \times (x-6P_m)(x-7P_m)(x-8P_m)(x-9P_m)(x-10P_m);$$

$$l_4(x) = \frac{1}{P_m^{10} 4! 6!} x(x-1P_m)(x-2P_m)(x-3P_m)(x-5P_m) \times \\ \times (x-6P_m)(x-7P_m)(x-8P_m)(x-9P_m)(x-10P_m);$$

$$l_5(x) = \frac{1}{-P_m^{10} 5! 5!} x(x-1P_m)(x-2P_m)(x-3P_m)(x-4P_m) \times \\ \times (x-6P_m)(x-7P_m)(x-8P_m)(x-9P_m)(x-10P_m);$$

$$l_6(x) = \frac{1}{P_m^{10} 6! 4!} x(x-1P_m)(x-2P_m)(x-3P_m)(x-4P_m) \times \\ \times (x-5P_m)(x-7P_m)(x-8P_m)(x-9P_m)(x-10P_m).$$

Возможность применения предложенной математической модели зависимости погрешности выходного сигнала датчика силы от приложенной нагрузки для датчиков, имеющих различные значения максимальной нагрузки, подтверждена при проведении математического моделирования в среде MathCAD.

Графики зависимостей погрешности выходного сигнала датчиков силы на 50 и 100 тс от приложенной нагрузки приведены соответственно на рис. 6 и 7.

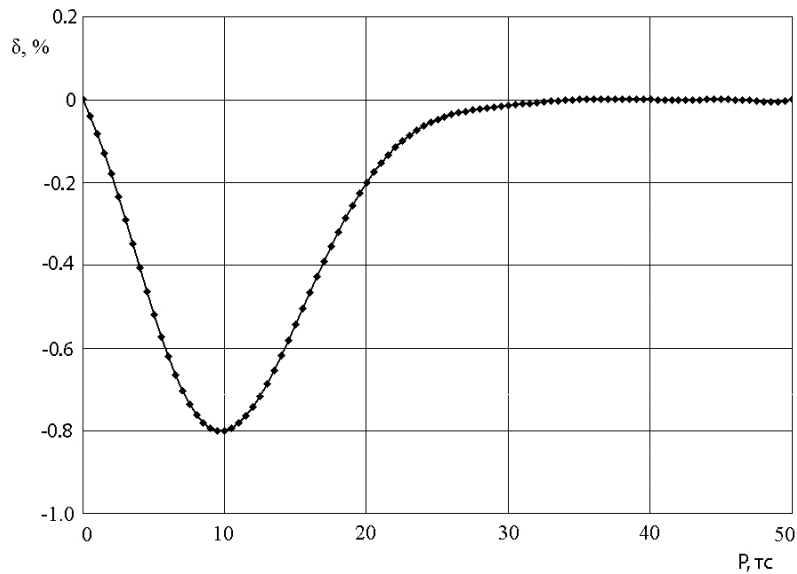


Рис. 6. График полученной степенной функции, описывающей зависимость погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки для датчика с максимальной нагрузкой 50 тс

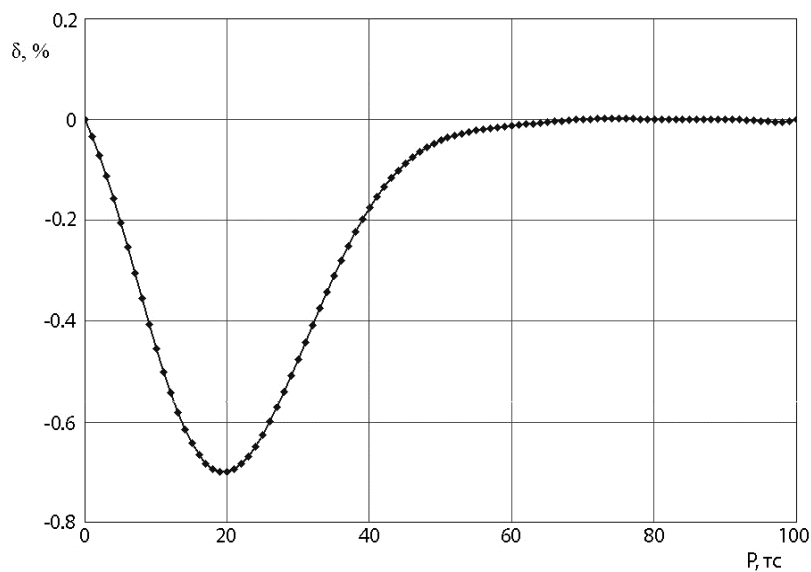


Рис. 7. График полученной степенной функции, описывающей зависимость погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки для датчика с максимальной нагрузкой 100 тс

Проверка полученных зависимостей для датчиков с максимальной нагрузкой 50 и 100 тс была проведена в среде MathCAD путем подстановки значений аргументов известных узлов исходных функций. Проведенная проверка показала расхождение значений исходных и полученных функций в известных узлах не более 0,02 %.

Заключение

Применение предложенной модели зависимости погрешности выходного сигнала от приложенной нагрузки тензорезистивных датчиков силы позволяет учесть нелинейность функции преобразования датчиков силы во всем диапазоне нагрузок. Благодаря этому возможно снижение основной погрешности ИИС, построенных на основе датчиков силы. При этом для использования предложенной математической модели не требуется точного снятия зависимости выходного сигнала от приложенной нагрузки во всем диапазоне нагрузок, что значительно упрощает процесс наладки систем с использованием датчиков силы.

Список литературы

1. **Стучебников, В. М.** Исследование температурного дрейфа и нелинейностей тензопреобразователей давления на основе керамики / В. М. Стучебников, А. А. Устинов, Ю. С. Нагорнов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 2 (14). – С. 62–69.
2. **Майоров, А. В.** Метод снижения температурной погрешности аналого-цифровых преобразователей информационно-измерительных систем на основе «систем на кристалле» / А. В. Майоров // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 96–99.
3. Спецификация на тензорезисторы серии SG-Y. – URL: http://www.hbm.cz/Prospekty/Tenzometry/SG_Y/cat_sg_y_e.pdf
4. Стабилитроны серии 2C198. – URL: <http://www.nzpp.ru/product/page23.php>
5. Описание нановольт-микроомметра типа AGILENT TECHNOLOGIES 34420. – URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-0161EN.pdf>
6. **Демидович, Б. П.** Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М. : Наука, 1966. – 664 с.
7. **Натансон, И. П.** Конструктивная теория функций / И. П. Натансон. – М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1949. – 688 с.

References

1. Stuchebnikov V. M., Ustinov A. A., Nagornov Yu. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 2 (14), pp. 62–69.
2. Mayorov A. V. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, pp. 96–99.
3. *SG-Y piezoresistor specification*. Available at: http://www.hbm.cz/Prospekty/Tenzometry/SG_Y/cat_sg_y_e.pdf
4. Voltage-reference diode of 2S198 series. Available at: <http://www.nzpp.ru/product/page23.php>
5. *Manual for AGILENT TECHNOLOGIES 34420 abvolt-micrometer*. Available at: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-0161EN.pdf>
6. Demidovich B. P., Maron I. A. *Osnovy vychislitel'noy matematiki* [Basic calculus mathematics]. Moscow: Nauka, 1966, 664 p.
7. Natanson I. P. *Konstruktivnaya teoriya funktsiy* [Constructive theory of functions]. Moscow: Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit-ry, 1949, 688 p.

Майоров Артем Владиславович

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ibaness@yandex.ru

Mayorov Artem Vladislavovich

Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: retch@pnzgu.ru

Svetlov Anatoliy Vil'evich

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of radio engineering and radio electronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Майоров, А. В.

Математическая модель зависимости погрешности выходного сигнала тензорезистивных датчиков силы от приложенной нагрузки / А. В. Майоров, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 1 (33). – С. 81–91.