

Восстановление входных сигналов вихретоковых преобразователей перемещения при термоударных воздействиях

И. В. Бойков¹, Н. П. Кривулин¹, С. В. Абрамов², В. П. Маланин², В. В. Кикот²

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: i.v.boykov@gmail.com, krivulin@bk.ru

²Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия, e-mail: abramov2011s@mail.ru, malaninVP1948@mail.ru, kikot.v.v@mail.ru

Предложен метод восстановления входных сигналов вихретоковых преобразователей перемещения при термоударном воздействии. Восстановление входного сигнала проведено при коррекции выходных данных первичного измерительного преобразователя. Коррекция основана на методах идентификации нелинейных динамических систем, описанных дискретными рядами Вольтерра.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь перемещения, термоударное воздействие, динамические системы, идентификация нелинейных систем, восстановление входного сигнала, редукция к идеальному прибору, дискретные ряды Вольтерра.

Вихретоковые преобразователи (ВТП) находят широкое применение при измерениях перемещений и биений валов. Главными преимуществами таких преобразователей являются простота конструкций, высокая надёжность и работа в широком диапазоне температур: от криогенных $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

В зоне крепления ВТП, как правило, возникает погрешность, обусловленная изменениями температуры от -196 до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Иногда данная погрешность может достигать 30 %. В преобразователях, построенных по квазидифференциальной схеме и имеющих дополнительную компенсационную катушку, при термоударных воздействиях необходимо в динамическом режиме корректировать возникающую температурную погрешность. Функциональная схема ВТП, выполненного по квазидифференциальной схеме, представлена на рис. 1, а, а его эквивалентная схема замещения – на рис. 1, б. Вихретоковый преобразователь, измеряющий расстояние h до объекта контроля 1, состоит из керамического корпуса 2, в котором на металлическом каркасе 5 размещены измерительная катушка 3, компенсационная катушка 4 и экранирующая пластина 6. Экранирующая пластина служит для снижения начального разбаланса выходных токов с измерительной и компенсационной катушек. Перемещение h до контролируемого объекта определяется по значению комплексного сопротивления измерительной катушки, которое зависит от изменений вихревых токов в объекте. Вихревые токи действуют встречно основному магнитному потоку измерительной катушки [1, 2]. Это приводит к изменению встречного основного магнитного потока и, как следствие, к изменению комплексного сопротивления измерительной катушки. Таким образом, применив экспоненциальную зависимость изменения модуля комплексного сопротивления измерительной катушки от перемещения, можно определить перемещения контролируемого объекта [1, 2].

Схема замещения ВТП имеет два контура (см. рис. 1, б). Первый – измерительный контур Z_x – является LR -цепочкой, состоящей из параллельного соединения двух

последовательных цепей: начальной индуктивности L_n с сопротивлением R_n обмотки измерительной катушки и вносимой индуктивности $L_{вн}$ с вносимым сопротивлением $R_{вн}$, зависящих от измеряемого перемещения. Вторым контуром Z_k – компенсационный. Он представляет собой последовательное соединение индуктивности L_k и сопротивления R_k обмотки компенсационной катушки. При дифференциальном включении контуров в измерительную цепь и питания катушек противофазным синусоидальным напряжением токи I_x , I_k , протекающие соответственно по измерительному и компенсационному контурам, вычитаются. Полученная разность токов ΔI , пропорциональная измеряемому перемещению, преобразуется вторичным преобразователем интеллектуального датчика в цифровой выходной код. Представленная модель является аппроксимацией электронного преобразователя, основанного на информативных параметрах эквивалентной схемы замещения ВТП. С помощью электронного преобразователя можно повысить точность измерений перемещения объекта контроля и снизить температурную погрешность.

В работе [1] предложен алгоритм построения функции преобразования первичного измерительного преобразователя (ПИП) в установившемся температурном режиме. Алгоритм реализован в предположении существования линейной зависимости выходного напряжения от перемещения. Однако если термоударное воздействие длится 49 с (в течение переходного процесса), то возникают сомнения в достоверности проводимых измерений. Наблюдается существенная разность температур в измерительном и компенсационном контурах, приводящая к нарушению предполагаемой линейной зависимости. Поэтому авторы настоящей статьи разработали метод восстановления входного сигнала при термоударном воздействии. Метод основан на идентификации нелинейных динамических систем. По мнению авторов, для восстановления входного сигнала необходимо обработать выходной сигнал с помощью специального корректирующего устройства. Такое корректирующее устройство допускается выполнить как программными, так и аппаратными способами.

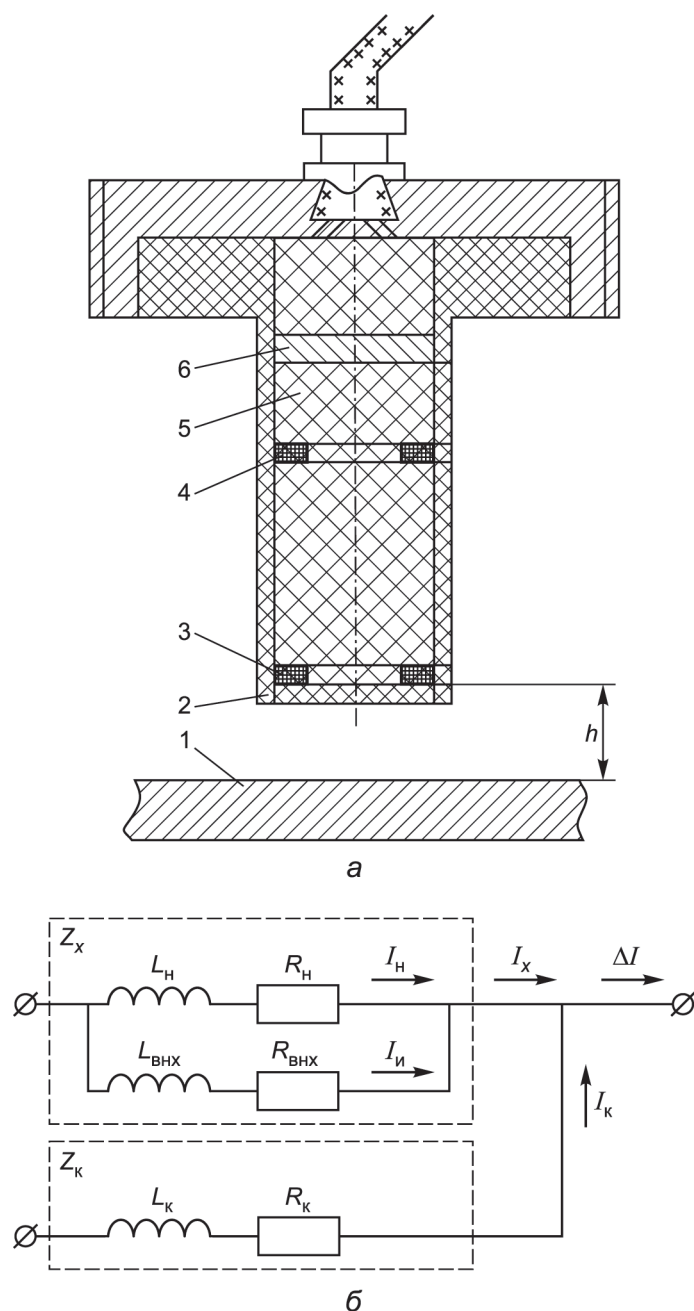


Рис. 1. Вихретоковый преобразователь перемещений (а) и его эквивалентная схема замещения (б): 1 – контролируемый объект; 2 – керамический корпус; 3 – измерительная катушка; 4 – компенсационная катушка; 5 – металлический каркас; 6 – экранирующая пластина

Восстановление входного сигнала при статическом температурном режиме. При статическом температурном режиме температура изменяется с градиентом $20\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$. Поэтому можно считать, что температура измерительной и компенсационной катушек примерно одинаковая. Для коррекции температурной погрешности в этом случае используют датчик температуры, размещённый в корпусе ПИП. По сигналу датчика температуры включает-

ся вторичный преобразователь, который и корректирует температурную погрешность.

Постановка задачи. Для установившегося эксплуатационного температурного режима T_s по значениям выходного сигнала $u(x_0, T_s)$ требуется определить статическое перемещение $x(t)=1(t)h$, где $1(t)$ – единичная функция.

Решение задачи. Определим функцию преобразования ПИП для указанного температурного режима:

$$u(x, T_s) = k(T_s)x + b(T_s), \quad (1)$$

где x – перемещение; $k(t)$, $b(t)$ – коэффициенты преобразования и смещения нуля, соответственно.

Коэффициенты $k(t)$, $b(t)$ в выражении (1) вычислим по двум известным перемещениям x_0 , x_n . Для каждого перемещения при температурах T_1 , T_2 экспериментальным путём получим два соответствующих выходных сигнала ПИП: для перемещения x_0 – $u(x_0, T_1)$, $u(x_0, T_2)$, а для x_n – $u(x_n, T_1)$, $u(x_n, T_2)$. Определим функциональную зависимость выходного сигнала $u(x_0, T)$ от температуры T по известным значениям: для T_1 – $u(x_0, T_1)$, а для T_2 – $u(x_0, T_2)$. Функциональная зависимость имеет вид линейной функции.

Для выходного сигнала $u(x_0, T)$ при $T_1 \leq T < T_2$ запишем выражение

$$u(x_0, T) = \frac{u(x_0, T_2) - u(x_0, T_1)}{T_2 - T_1} (T - T_1) + u(x_0, T_1). \quad (2)$$

Аналогичное выражение используем и для выходного сигнала $u(x_n, T)$ при тех же температурах:

$$u(x_n, T) = \frac{u(x_n, T_2) - u(x_n, T_1)}{T_2 - T_1} (T - T_1) + u(x_n, T_1). \quad (3)$$

Подставим (2), (3) в (1) и рассчитаем значения коэффициентов $k(T_s)$, $b(T_s)$:

$$k(T_s) = \frac{u(x_n, T_s) - u(x_0, T_s)}{x_n - x_0};$$

$$b(T_s) = u(x_0, T_s) - \frac{u(x_n, T_s) - u(x_0, T_s)}{x_n - x_0} x_0.$$

Восстановим значения статических перемещений $x(T_s)$ по наблюдаемому выходному напряжению $u(x, T_s)$ при установившемся эксплуатационном температурном режиме T_s по формуле

$$x(T_s) = \frac{1}{k(T_s)} [u(x, T_s) - b(T_s)], \quad k(T_s) \neq 0.$$

Восстановление значений динамических перемещений в режиме термоударных воздействий. Представленный выше алгоритм не применим при термо-

ударных воздействиях, так как происходящие в ВТП нелинейные процессы приводят к существенной разности температур измерительной и компенсационной катушек. Использование датчика температуры в этом случае также невозможно, так как он не может точно определить температуру каждой из катушек, а некорректное определение температуры, в свою очередь, приведёт к неточности в измерениях информативного параметра – перемещения.

На рис. 2 показано изменение температуры измерительной и компенсационной катушек, находящихся в эксплуатационном температурном режиме 25 °С при термоударном воздействии 200 °С. Наблюдается значительное расхождение температур обеих катушек в течении 49 с, причём в момент термоудара разность температур близка к амплитуде термоудара.

Определение точных значений перемещений при термоударном воздействии будем рассматривать как задачу восстановления входных сигналов дискретных нелинейных динамических систем. При решении такой задачи возможны два подхода. Первый подход предполагает совершенствование конструкции прибора. Изменение конструкции необходимо для сведения к минимуму искажений в системе приёма сигнала. Второй подход заключается в восстановлении самих сигналов по определённым алгоритмам. Такие алгоритмы должны учитывать влияние средств измерений и внесённых помех на искажение входного сигнала.

В данной работе авторы применили второй подход, основанный на разработке математической модели измерительной системы восстановления входного сигнала. При исследованиях любых нелинейных систем можно использовать модели типа вход-выход, описываемые рядами Вольтерра [3–5]. В дискретном случае этот ряд имеет вид

$$f(k) = \sum_{l=0}^k g_1(k, l)w(l) + \dots + \sum_{l_n=0}^k \dots \sum_{l_2=0}^k \sum_{l_1=0}^k g_n(k, l_1, l_2, \dots, l_n) \prod_{i=1}^n w(l_i) + \dots$$

где $f(k)$ – выходной сигнал, $k=1, 2, \dots$, – дискретные отсчёты времени наблюдения выходного сигнала; $g_i(k, l_1, \dots, l_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ – ядра Вольтерра; $w(l)$ – входной сигнал, действующий на систему в дискретные отсчёты времени $l=1, 2, \dots, k$.

Модель типа вход-выход определяет соответствие между входными и выходными сигналами измерительных преобразователей, выполненных на различной элементной базе. Это позволяет не исследовать физические процессы в ПИП, так как данные процессы при термоударных воздействиях изучены не достаточно хорошо. Разработанный метод восстановления входного сигнала основан на коррекции выходного сигнала $u(k, l)$ ПИП при термоударном воздействии и осуществляет редукцию к идеаль-

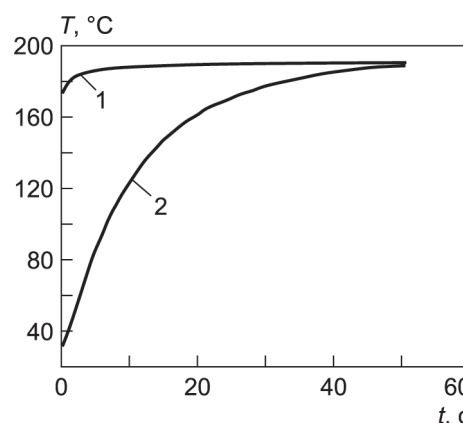


Рис. 2. Изменения температуры измерительной (1) и компенсационной (2) катушек, находящихся в эксплуатационном температурном режиме 25 °С при термоударном воздействии 200 °С

ному прибору. В основу предложенного метода положены способы идентификации систем [6–8].

Рассмотрим нелинейную динамическую измерительную систему, модель которой описана дискретным рядом Вольтерра второго порядка:

$$x(k) = \sum_{l=0}^k g_1(k, l, T)u(l, T) + \sum_{l_1=0}^k \sum_{l_2=0}^{k-l_1} g_2(k, l_1, l_2, T)u(l_1, T)u(l_2, T), \quad (4)$$

где $k=0, 1, \dots, 49$ – дискретные отсчёты (в секундах) времени наблюдения выходного сигнала; $x(l)$, $l=0, 1, \dots, k$ – эталонный входной сигнал ПИП, независимый от значения T ; $g_1(k, l, T)$, $g_2(k, l_1, l_2, T)$ – параметрические ядра Вольтерра, подлежащие восстановлению; T – температура, выступающая в качестве параметра.

Входными сигналами в формуле (4) являются эталонные перемещения контролируемого объекта. Выходной сигнал $u(k, T)$ наблюдается в интервале времени, в течение которого происходят нелинейные процессы при фиксированном значении T . Выходной сигнал равен разности напряжений на измерительной L_1 и компенсационной L_2 катушках:

$$u(k, T) = u_{L_1}(k, T) - u_{L_2}(k, T).$$

При построении математической модели измерительной системы (4) в виде ряда Вольтерра значения $g_1(k, l, T)$, $g_2(k, l_1, l_2, T)$ определим в предположении, что они удовлетворяют условиям, представленным ниже.

1. Условие физической реализуемости измерительной системы можно представить как

$$g_1(k, l, T) = 0 \text{ при } k > l; \\ g_2(k, l_1, l_2, T) = 0 \text{ при } k > l_1 + l_2. \quad (5)$$

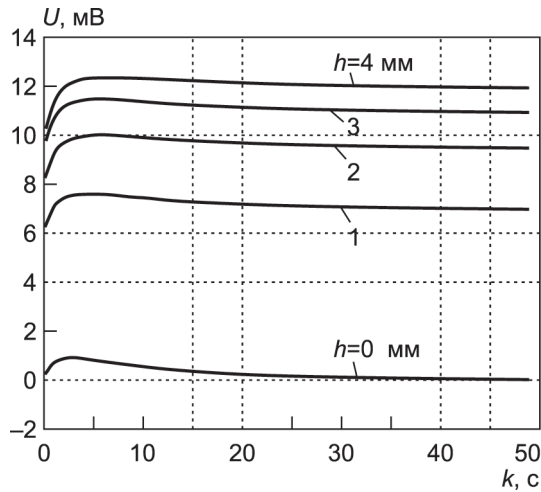


Рис. 3. Временные зависимости выходных сигналов $u_0 - u_4$ при соответствующих различных перемещениях $h=0; 1; 2; 3; 4$ мм и заданной температуре -50°C

2. Z-преобразования функций $g_1(k, l, T)$, $g_2(k, l_1, l_2, T)$ по переменной k должны удовлетворять условиям

$$\begin{aligned} Z_k[g_1(k, l, T)] &= G_1(z, T)z^{-l}; \\ Z_k[g_2(k, l_1, l_2, T)] &= G_2(z, T)z^{-(l_1+l_2)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $G_1(z, T)$, $G_2(z, T)$ – некоторые аналитические функции в области $\text{Re}(z) > \sigma$, $\sigma \equiv \text{const}$.

Вычисление ядер Вольтерра основано на следующем утверждении.

Утверждение. Пусть ядра Вольтерра системы (4) удовлетворяют условиям (5), (6). Тогда Z-преобразование уравнения (4) будет иметь вид

$$X(z) = G_1(z, T)U(z, T) + G_2(z, T)U^2(z, T),$$

где $U(z, T) = Z_k[u(k, T)]$, $X(z) = Z_k[x(k)]$.

Действительно, пусть оператор $Z = Z_k[f_k]$ – есть Z-преобразование последовательности $\{f_k\}$ по переменной k . Найдём Z-преобразование уравнения (4). Тогда с учётом условий (5), (6) имеем

$$\begin{aligned} Z[x(k)] &= Z \left[\sum_{l=0}^{+\infty} g_1(k, l, T)u(l, T) \right] + \\ &+ Z \left[\sum_{l_1=0}^{+\infty} \sum_{l_2=0}^{+\infty} g_2(k, l_1, l_2, T)u(l_1, T)u(l_2, T) \right] = \\ &= \sum_{l=0}^{+\infty} Z[g_1(k, l, T)]u(l, T) + \\ &+ \sum_{l_1=0}^{+\infty} \sum_{l_2=0}^{+\infty} Z[g_2(k, l_1, l_2, T)]u(l_1, T)u(l_2, T) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{l=0}^{+\infty} G_1(z, T)z^{-l}u(l, T) + \\ &+ \sum_{l_1=0}^{+\infty} \sum_{l_2=0}^{+\infty} G_2(z, T)z^{-(l_1+l_2)}u(l_1, T)u(l_2, T) = \\ &= G_1(z, T) \sum_{l=0}^{+\infty} u(l, T)z^{-l} + \\ &+ G_2(z, T) \left[\sum_{l_1=0}^{+\infty} u(l_1, T)z^{-l_1} \right] \left[\sum_{l_2=0}^{+\infty} u(l_2, T)z^{-l_2} \right] = \\ &= G_1(z, T) \sum_{k=0}^{+\infty} u(k, T)z^{-k} + \\ &+ G_2(z, T) \left[\sum_{k=0}^{+\infty} u(k, T)z^{-k} \right] \left[\sum_{k=0}^{+\infty} u(k, T)z^{-k} \right] = \\ &= G_1(z, T)U(z, T) + G_2(z, T)U^2(z, T). \end{aligned} \quad (7)$$

Из выражения (7) следует справедливость приведенного выше утверждения.

Следствие. Используя теорему запаздывания аргумента и условия (5), (6), преобразуем уравнение (4) к виду

$$\begin{aligned} x(k) &= \sum_{l=0}^k g_1(k-l, T)u(l, T) + \\ &+ \sum_{l_1=0}^k \sum_{l_2=0}^{k-l_1} g_2[k-(l_1+l_2), T]u(l_1, T)u(l_2, T). \end{aligned} \quad (8)$$

Параметрические ядра Вольтерра $g_1(k, T)$, $g_2(k, T)$ из выражения (8) вычислим с помощью обратного Z-преобразования:

$$\left. \begin{aligned} g_1(k, T) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{Br} G_1(z, T)z^{k-1}dz; \\ g_2(k, T) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{Br} G_2(z, T)z^{k-1}dz, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $k=0, 1, 2, \dots, 49$; Br – контур Бромвича.

Уравнение (8) положено в основу метода восстановления значений динамических перемещений при термоударном воздействии.

Общий подход к определению ядер Вольтерра в моделях вход-выход нелинейных динамических систем исследован в работе [7].

Постановка задачи. При известном T_d – термоударном воздействии и серии двух экспериментально полученных выходных сигналов $u_1(k, T_d)$, $u_2(k, T_d)$, которые фиксируются при перемещениях $x_1(k)$, $x_2(k)$, требуется определить

ядра Вольтерра измерительной системы, описываемой уравнением

$$x(k) = \sum_{l=0}^k g_1(k-l, T_d) u(l, T_d) + \sum_{l_1=0}^k \sum_{l_2=0}^{k-l_1} g_2[k-(l_1+l_2), T_d] u(l_1, T_d) u(l_2, T_d). \quad (10)$$

Решение. Используя уравнение (10), по совокупности входных $x_1(k)$, $x_2(k)$ и соответствующих им выходных $u_1(k, T_d)$, $u_2(k, T_d)$ сигналов получим систему уравнений

$$x_i(k) = \sum_{l=0}^k g_1(k-l, T_d) u_i(l, T_d) + \sum_{l_1=0}^k \sum_{l_2=0}^{k-l_1} g_2[k-(l_1+l_2), T_d] u_i(l_1, T_d) u_i(l_2, T_d), \quad i=1, 2. \quad (11)$$

Применив Z-преобразование по переменной k к системе (11) при выполнении условий (5), (6), получим систему линейных алгебраических уравнений относительно функций $G_1(z, T_d)$, $G_2(z, T_d)$:

$$\left. \begin{aligned} X_1(z) &= G_1(z, T_d) U_1(z, T_d) + G_2(z, T_d) U_1^2(z, T_d); \\ X_2(z) &= G_1(z, T_d) U_2(z, T_d) + G_2(z, T_d) U_2^2(z, T_d). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Из системы (12) вычислим функции $G_1(z, T_d)$, $G_2(z, T_d)$ и по формулам (9) восстановим ядра Вольтерра $g_1(k, T_d)$, $g_2(k, T_d)$ из уравнения (11).

Восстановление перемещения в процессе эксплуатации при заданном термоударном воздействии T_d проведём по формуле (11). При построении метода восстановления используем следующие экспериментальные данные. При заданных перемещениях $x_i(k) = h_i 1(k)$, $i=1, 2, \dots, 5$, с шагами перемещений, равными $h_1=0$ мм, $h_2=1$ мм, $h_3=2$ мм, $h_4=3$ мм, $h_5=4$ мм, где $1(k)$ – единичная функция, получим значения выходного сигнала $u_i(k, T_m)$. В данном случае рассмотрены режимы термоударных воздействий $m=0, 1, 2, \dots, 5$, соответствующие температурам $T_0=-200$ °С, $T_1=-100$ °С, $T_2=-50$ °С, $T_3=+50$ °С, $T_4=+100$ °С, $T_5=+200$ °С. Временные зависимости выходного сигнала при $T=-50$ °С и различных перемещениях представлены на рис. 3. Дискретные моменты времени соответствуют $k=0, 1, \dots, 49$ с. Эти зависимости можно применить для построения математической модели в виде ряда Вольтерра с нелинейностью пятого порядка.

Предложенный метод иллюстрируется моделью с нелинейностью второго порядка. При определении ядер Вольтерра (11) авторы использовали экспериментально по-

лученные зависимости выходных сигналов $u_1(k, -50$ °С), $u_2(k, -50$ °С) при входных перемещениях $x_1(k)=h_1 1(k)$, $x_2(k)=h_2 1(k)$, $h_1=1$ мм, $h_2=3$ мм.

Значения восстановленных ядер Вольтерра для первых десяти секунд определены функциями $g_1(k, -50)=10^{-3} \hat{g}_1(k)$, $g_2(k, -50)=10^{-3} \hat{g}_2(k)$. Значения $\hat{g}_1(k)$, $\hat{g}_2(k)$ и результаты восстановления входного перемещения $h=2$ мм для первых 10 с приведены в таблице. Максимальная погрешность восстановления перемещения составила менее 6 %.

Восстановление входного сигнала при термоударном воздействии в процессе эксплуатации серийного объекта. В процессе эксплуатации серийного объекта режим термоударного воздействия $T_s \neq T_i$, $i=0, 1, \dots, 5$, может отличаться от режимов T_i , $i=0, 1, \dots, 5$, при которых проводились тестовые испытания. Поэтому модель восстановления входного сигнала требует коррекции.

Коррекция модели для термоударного воздействия $T_s \neq T_i$, $i=0, 1, \dots, 5$, и восстановление входных сигналов состоит из трёх этапов:

Первый этап. Определение значений выходных сигналов $u_i(k, T_s)$, $i=1, 2$, для тестовых входных $x_i(k)$, $i=1, 2$, сигналов.

Для заданного тестового перемещения $x(k)$ строится функциональная зависимость выходного сигнала $u(k, T)$ от термоударного T воздействия в моменты времени. Функциональная зависимость $T_i \leq T < T_{i+1}$, $i=0, 1, \dots, 4$, представляет собой линейный сплайн:

$$u(k, T) = \frac{u(k, T_{i+1}) - u(k, T_i)}{T_{i+1} - T_i} (T - T_i) + u(k, T_i). \quad (13)$$

Таким образом, для тестовых перемещений $x_1(k)$, $x_2(k)$ значения выходных сигналов при термоударных воздействиях $T_s \neq T_i$, $i=0, 1, \dots, 5$, можно рассчитать по формуле (13):

$$u_m(k, T_s) = \frac{u(k, T_{i+1}) - u(k, T_i)}{T_{i+1} - T_i} (T_s - T_i) + u(k, T_i), \quad T_i \leq T_s < T_{i+1}, \quad i=0, 1, \dots, 4; \quad m=1, 2. \quad (14)$$

Второй этап. Ядра Вольтерра $g_1(k, l, T_s)$, $g_2(k, l_1, l_2, T_s)$ для термоударного воздействия определяются по серии тестовых входных сигналов $x_1(k)$, $x_2(k)$ и соответствующих выходных сигналов $u_1(k, T_s)$, $u_2(k, T_s)$, полученных по формуле (14) описанным выше методом.

Третий этап. Восстановление динамического перемещения при термоударном T_s воздействии по наблюда-

Восстановленные значения ядер Вольтерра $\hat{g}_1(k)$, $\hat{g}_2(k)$ и входного перемещения $\tilde{h}$ при термоударном воздействии $T=-50$ °С

$\hat{g}(k)$	k, c										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\hat{g}_1(k)$	-111	-24	0,186	3,082	3,594	3,507	3,296	2,996	2,718	2,477	2,234
$\hat{g}_2(k)$	44	-51	4,723	1,180	0,432	0,206	0,100	0,062	0,004	0,002	0,0015
$\tilde{h}$	1,996	2,058	2,082	2,093	2,100	2,105	2,108	2,111	2,113	2,114	2,115

емым значениям выходного сигнала $u(k, T_s)$ производится по формуле

$$x(k) = \sum_{l=0}^k g_1(k-l, T_s) u(l, T_s) + \\ + \sum_{l_1=0}^k \sum_{l_2=0}^{k-l_1} g_2[k-(l_1+l_2), T_s] u(l_1, T_s) u(l_2, T_s).$$

Замечание 1. Первый и второй этапы можно выполнить либо при калибровке датчика, либо при его эксплуатации для возможных термоударных воздействий, либо для всего диапазона термоударных воздействий с некоторым шагом. При этом значения ядер Вольтерра необходимо хранить в памяти микроконтроллера. Так, при термоударных воздействиях в диапазоне $-200...+200$ °C с шагом 1 °C в интервале времени $k=0, 1, \dots, 49$ с потребуется память для хранения $50 \cdot 401 = 20050$ значений для каждого ядра $g_1(k, T_s), g_2(k, T_s)$.

Замечание 2. При реализации предложенного метода коррекции динамических систем возникают погрешности, обусловленные следующими причинами:

бесконечный ряд Вольтерра, которым в общем случае описывается система вход-выход, аппроксимируется конечной суммой;

система линейных уравнений (12) решается с неточными значениями коэффициентов и правой части. Погрешность в определении этих коэффициентов и правой части системы уравнений (12) обусловлена погрешностями исходных данных (результатов измерений) и погрешностью вычисления прямого Z-преобразования;

погрешностью приближённого вычисления интегралов в формуле обратного Z-преобразования.

Оценим погрешности, вносимые каждой из этих причин.

Теоретически оценить погрешность, вносимую редукцией ряда Вольтерра, не представляется возможным без исследования физики процесса. Эмперически же её можно оценить, вычислив следующее слагаемое в ряде Вольтерра. Однако это трудоёмко и вряд ли целесообразно.

Погрешность, вносимая при решении системы уравнений (12), оценивается стандартными методами вычислительной математики [9] и имеет погрешность, сопоставимую с погрешностью задания коэффициентов системы и правой части.

Погрешность, вносимая при приближённом вычислении обратного Z-преобразования, состоит из двух слагаемых: погрешности интегрируемых функций $X_1(z), X_2(z)$ и погрешности собственно квадратурных формул. Первое слагаемое имеет порядок погрешности задания интегрируемых функций, второе – $O(1/n)$, где n – число узлов квадратурной формулы. Аналогично оценивается погрешность вычисления прямого Z-преобразования.

Заключение. Предложены алгоритмы восстановления входных сигналов дискретных нелинейных динамических систем методом редукции к идеальному прибору. Метод

основан на способах идентификации нелинейных динамических систем. Показана возможность алгоритмического решения проблемы редукции к идеальному прибору в динамических системах, описываемых моделями вход-выход.

Реализуемое на основе предложенного в статье подхода схемотехническое решение, направленное на снижение температурной погрешности измерения перемещений интеллектуальными вихретоковыми датчиками, представляет интерес при создании автономных систем мониторинга работоспособности технически сложных объектов.

Рассмотренный в статье алгоритм преобразования выходного сигнала ВТП реализован путём дополнения имеющегося программного обеспечения микроконтроллера вторичного преобразователя датчика, а также введения в процесс изготовления ВТП дополнительных операций по калибровке датчика и настройке его вторичного преобразователя с учётом наиболее характерных для процесса эксплуатации температурных изменений. Отметим, что это не требует существенного увеличения объёма приёмо-сдаточных испытаний.

Практическая значимость и универсальность предложенного подхода обусловлена тем, что повышение точности измерения достигается без введения дополнительных элементов в конструкции интеллектуальных датчиков и с сохранением их массогабаритных характеристик. Это позволяет использовать предложенный авторами подход для коррекции результатов измерений при различных принципах построения информационно-измерительных систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16–01–594).

Литература

1. **Датчики. Преобразователи. Системы:** Каталог. Пенза: Федеральный научно-производственный центр ФГУП НИИ физических измерений, 2012.
2. **Пат. № 2487314 РФ.** МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/90. Вихретоковый преобразователь перемещений / В. П. Маланин, В. Н. Колганов, М. Д. Пресняков, С. В. Абрамов // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 19.
3. **Вольтерра В.** Теория функционалов и интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1982.
4. **Пупков К. А., Капалин В. И., Ющенко А. С.** Теоретические основы кибернетики. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. М.: Наука, 1976.
5. **Doule F. J., Pearson R. K., Ogunnaike B. A.** Identification and Control Using Volterra Models. London: Springer, 2002.
6. **Бойков И. В., Кривулин Н. П.** Аналитические и численные методы идентификации динамических систем. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016.
7. **Бойков И. В., Кривулин Н. П.** Идентификация параметров нелинейных динамических систем // Сибир-

ский журнал индустриальной математики. 2018. Т. XXI. № 2(74). С. 17–31.

8. **Щербаков М. А.** Итерационный метод оптимальной нелинейной фильтрации изображений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2011. № 4 (20). С. 43–56.

ские науки. 2011. № 4 (20). С. 43–56.

9. **Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М.** Численные методы. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003.

Дата принятия: 17.07.2018.

The recovery of the input signals eddy current displacement transducers in case of thermal shock effects

I. V. Boikov¹, N. P. Krivulin¹, S. V. Abramov², V. P. Malanin², V. V. Kikot²

¹Penza State University, Penza, Russia, e-mail: i.v.boikov@gmail.com, krivulin@bk.ru

²NIIFI, Penza, Russia, e-mail: abramov2011s@mail.ru, malaninVP1948@mail.ru, kikot.v.v@mail.ru

In this paper we propose a method for recovering the input signals of vortex current displacement transducers under thermal shock. The restoring of the input signal is carried out correction of the output of the primary measuring converter. The correction is based on the methods of identification of nonlinear dynamical systems described by discrete Volterra series.

Key words: vortex current displacement sensor, thermal impact effect, dynamical systems, identification of nonlinear systems, the restoring of the input signal, reduction to ideal device, discrete Volterra series.