

УДК 681.3.06

В. Х. ЯСОВЕЕВ, Р. Р. ИСХАКОВ

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ТЕСТОВОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ЛИНЕЙНОГО РАССТОЯНИЯ И КОМПЕНСАЦИОННЫМИ ОБМОТКАМИ

Рассмотрены факторы, препятствующие улучшению метрологических характеристик магнитострикционных преобразователей перемещения, и принципы повышения точности преобразователей с применением тестовой величины линейного расстояния и компенсационных обмоток. *Магнитострикционный преобразователь; преобразователи перемещения; тестовые величины; помехоустойчивость*

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность автоматизированных систем контроля и управления зависит в немалой степени от качества измерительной информации о контролируемых объектах, процессах и т. п., а следовательно, и от метрологических характеристик средств измерения, которые поставляют измерительную информацию в автоматизированную систему. Магнитострикционные преобразователи перемещения (МПП), благодаря сравнительно большому диапазону преобразуемых перемещений, возможности бесконтактного преобразования в широком диапазоне рабочих температур, малому энергопотреблению, возможности сравнительно легкого сопряжения с цифровыми ЭВМ, являются на сегодняшний день весьма перспективным типом преобразователей линейного перемещения.

работ, посвященных увеличению точности МПП, позволяют значительно улучшить метрологические и другие характеристики МПП. Однако обеспечиваемые этими методами максимальные значения погрешности преобразования не удовлетворяют требованиям, предъявляемым в некоторых системах управления (в частности — применяемым в прецизионных гидроприводах) к преобразователям линейных перемещений.

1. БАЗОВАЯ СХЕМА МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

В основе принципа МПП лежит измерение времени распространения ультразвуковой (УЗ) волны от источника до приемника, расстояние между которыми задается положением контролируемого объекта.

Базовая структурная схема МПП приведена на рис. 1. Структурная схема МПП состоит из двух основных частей — первичного магнитострикционного преобразователя перемещения ПМПП, являющегося чувствительным элементом МПП, и блока обработки информации БОИ. При поступлении импульса «Старт» запускается преобразователь временных интервалов в код ПВИК и одновибратор ОВ формирует импульс напряжения калиброванной длительности, по которому генератор тока возбуждения ГТВ выдает в обмотку электроакустического преобразователя (ЭАП) 4 импульс тока той же длительности. Возле обмотки ЭАП возникает магнитное поле, поток которого частично проходит через звукопровод 1, выполненный из магнитострикционного материала. Вслед-

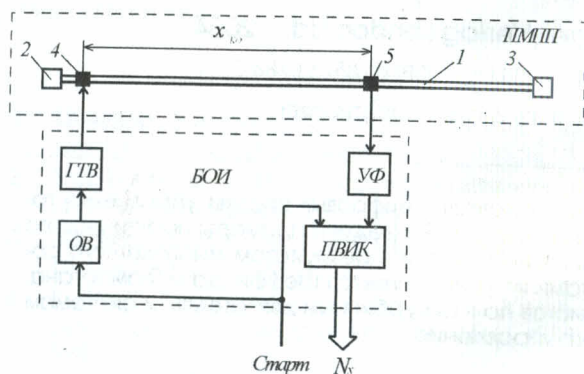


Рис. 1. Базовая схема магнитострикционного преобразователя перемещения

Конструктивные и алгоритмические методы, известные из опубликованных ранее

ствии прямого магнитоотрицательного эффекта (эффекта Джоуля) в звукопроводе возбуждается УЗ волна, представляющая собой упругие колебания, которая со скоростью $V_{уз}$ распространяется в обе стороны вдоль звукопровода. Через время задержки

$$t_x = \frac{x_{ко}}{V_{уз}} = S_{пмп} \cdot x_{ко} \quad (1)$$

она достигает места расположения акустоэлектрического преобразователя АЭП 5, где $x_{ко}$ — искомое расстояние между ЭАП и АЭП, $S_{пмп}$ — чувствительность ПМП. Вследствие обратного эффекта магнитоотрицательности (эффекта Вилари) в обмотке АЭП наводится импульс ЭДС. Для предотвращения отражения УЗ волны от концов звукопровода и наведения неинформативных импульсов ЭДС концы звукопровода заделаны в акустические демпферы 2 и 3. Информативный импульс ЭДС с помощью усилителя-формирователя УФ преобразуется в прямоугольный импульс напряжения, по которому останавливается работа ПВИК и на цифровых выходах последнего появляется код результата преобразования

$$N_x = \frac{t_x}{t_p} = \frac{S_{пмп} \cdot x_{ко}}{t_p} = \frac{x_{ко}}{x_p}, \quad (2)$$

где t_p — разрешающая способность ПВИК по времени, $x_p = t_p/S_{пмп}$ — разрешающая способность ПМП по перемещению. По сравнению с такими широко применяемыми типами преобразователей линейного перемещения, как потенциометрические, трансформаторные, фотоэлектрические и др., ПМП обладают меньшей погрешностью, большим диапазоном преобразуемых перемещений, более линейной статической характеристикой [1]. Однако наиболее существенным преимуществом ПМП является возможность эксплуатации в сложных условиях: в большом диапазоне температур и давлений, в агрессивных средах.

2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПМП

На основании анализа научной и патентной литературы были выявлены факторы, воздействие которых на ПМП приводит к возникновению систематической и случайной составляющих погрешности преобразования ПМП. Были сопоставлены порождаемые этими факторами максимальные величины погрешностей с порядками требуемых

значений погрешностей. При систематизации информации о наиболее эффективных известных методах уменьшения влияния этих факторов и сравнительной оценки максимального значения составляющих погрешности преобразования сделан вывод, что исследование следует проводить по направлению уменьшения двух систематических составляющих и случайной составляющей погрешности ПМП, а так как факторы, являющиеся источниками возникновения этих погрешностей, проявляются в общем случае независимо друг от друга, следует одновременно уменьшать эти две систематические и случайную составляющие погрешности.

Источником возникновения первой систематической составляющей является непостоянство скорости распространения ультразвуковой волны вдоль звукопровода. Предварительная калибровка ПМП и аппроксимация статической характеристики с помощью степенного полинома для уменьшения этой составляющей погрешности является трудоемкой операцией, а погрешность может снова увеличиться при изменении статической характеристики в процессе эксплуатации преобразователя, например, в результате ударов по звукопроводу, касания звукопроводом других частей преобразователя, локальном изменении температуры и подмагничивании звукопровода и т. п. Максимальное значение погрешности может быть в пределах от сотен мкм до единиц мм без компенсации и до 80 мкм — при аппроксимации статической характеристики первичного магнитоотрицательного преобразователя перемещения (ПМП) степенным полиномом.

Вторая систематическая составляющая погрешности вызвана затуханием ультразвуковой волны при ее распространении, которое приводит к уменьшению амплитуды выходного сигнала и запаздыванию момента срабатывания аналогового компаратора с постоянным пороговым напряжением [2]. Известные методы уменьшения погрешности от затухания ультразвуковой волны, основанные на использовании схем автоматического регулирования и фиксации момента времени по экстремуму выходного сигнала ПМП, являются сложными в технической реализации. Без компенсации абсолютное максимальное значение этой систематической составляющей погрешности может достигать нескольких миллиметров.

Источником возникновения существенной по величине, порядка нескольких мил-

лиметров, случайной составляющей погрешности преобразования могут являться помехи магнитного и механического происхождения (в результате перекоса звукопровода в обмотке при механических воздействиях на преобразователь сигнал с АЭП искажается). Уменьшить влияние магнитных помех позволяет применение компенсационных обмоток в конструкции АЭП. Однако методики определения требуемых значений параметров компенсационных обмоток и допустимого перекоса звукопровода исходя из заданного допустимого значения соответствующей погрешности отсутствуют.

3. МПП с тестовой величиной линейного расстояния

Уточнять статическую характеристику МПП в процессе работы преобразователя позволяет одновременная подача на вход преобразователя измеряемой величины $x_{\text{КО}}$ перемещения и суммы величины $x_{\text{КО}}$ и тестовой величины x_{T} линейного расстояния. Входное воздействие МПП определяется взаимным положением ЭАП и АЭП, являющихся по сути преобразователями рода сигнала (ПРС). Поэтому подвижный элемент МПП с тестовой величиной линейного расстояния может состоять из двух ПРС [3].

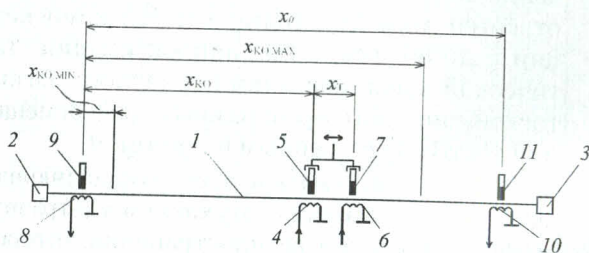


Рис. 2. Схема МПП с тестовой величиной линейного расстояния

На рис. 2 изображена схема МПП, работающего на продольных УЗ волнах и содержащего магнитоstrictionный звукопровод 1, концы которого заделаны в акустические демпферы 2 и 3, два подвижных ЭАП, состоящих из обмоток 4 и 6 и постоянных магнитов 5 и 7, и два неподвижных АЭП, состоящих из обмоток 8 и 10 и постоянных магнитов 9 и 11. Оба ЭАП образуют единый подвижный элемент, кинематически связанный с объектом контроля, и находятся на фиксированном расстоянии друг от друга, которое определяет тестовую величину x_{T} линейного расстояния.

Время, за которое ультразвуковая волна проходит участок звукопровода протяженностью x_{T} между координатами $x_{\text{КО}}$ и $(x_{\text{КО}} + x_{\text{T}})$, связано с распределением $V_{\text{УЗ}}(x)$ скорости ультразвуковой волны выражением

$$t_{\text{T}}(x_{\text{КО}}) = \int_{x_{\text{КО}}}^{x_{\text{КО}} + x_{\text{T}}} \frac{dx}{V_{\text{УЗ}}(x)}. \quad (3)$$

Удобнее представлять распределение скорости ультразвука и распределение длительности интервала времени t_{T} в виде функций $V_{\text{УЗ}}(t_{x1})$ и $t_{\text{T}}(t_{x1})$, аргумент t_{x1} которых представляет собой длительность интервала времени распространения ультразвуковой волны от обмотки 4 до обмотки 8.

В одном цикле преобразования перемещения во временные интервалы через обмотки 4 и 6 одновременно пропускается импульс тока и в звукопроводе под магнитами 5 и 7 возбуждаются две продольные волны механической деформации, которые распространяются вдоль звукопровода влево и вправо, и каждая из них наводит в обмотках 8 и 10 обоих АЭП по импульсу ЭДС. За один такой цикл преобразования на выходе МПП формируются четыре временных интервала:

$$t_{x1} = \tau_1 + \int_0^{x_{\text{КО}}} \frac{dx}{V_{\text{УЗ}}(x)}; \quad (4)$$

$$t_{x2} = \tau_1 + \int_0^{x_{\text{КО}} + x_{\text{T}}} \frac{dx}{V_{\text{УЗ}}(x)};$$

$$t_{x3} = \tau_2 + \int_{x_{\text{КО}} + x_{\text{T}}}^{x_0} \frac{dx}{V_{\text{УЗ}}(x)}; \quad (5)$$

$$t_{x4} = \tau_2 + \int_{x_{\text{КО}}}^{x_0} \frac{dx}{V_{\text{УЗ}}(x)},$$

где τ_1 и τ_2 — время задержки распространения сигнала в электронных цепях обработки сигналов, x_0 — координата положения обмотки 10. С помощью цифрового преобразователя временных интервалов в код (ПВИК), входящего в состав блока обработки информации, измеряется длительность этих временных интервалов. Результат измерения длительностей представлен кодами:

$$\begin{aligned} N_{x1} &= E \left(\frac{t_{x1}}{t_p} \right); & N_{x2} &= E \left(\frac{t_{x2}}{t_p} \right); \\ N_{x3} &= E \left(\frac{t_{x3}}{t_p} \right); & N_{x4} &= E \left(\frac{t_{x4}}{t_p} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $E()$ — целая часть выражения, t_p — разрешающая способность ПВИК по времени.

Разность значений кодов $N_T = N_{x2} - N_{x1}$ несет информацию о времени t_T прохождения ультразвуковой волной участка звукопровода протяженностью x_T . Величина N_T может вычисляться как разность кодов N_{x3} и N_{x4} .

На основе различных вариантов конструктивной реализации АЭП и ЭАП разработаны также конструкции ПМПП с тестовой величиной линейного расстояния, работающие с возбуждением продольных и крутильных ультразвуковых колебаний и позволяющие повысить чувствительность к перемещению, надежность за счет бесконтактного преобразования, выполнять дифференциальное преобразование перемещения.

При пропуске импульса тока возбуждения через обмотки ЭАП имеет место кратковременный электромагнитный импульс и наведение в обмотках 8 и 10 АЭП неинформативных ЭДС. Время, на которое при этом закрываются входы электронного устройства обработки информации, определяет протяженность зон нечувствительности акустоэлектрических преобразователей. Для минимизации протяженности участков звукопровода, которые из-за наличия зон нечувствительности АЭП не входят в диапазон преобразуемого перемещения, предлагается при положении ЭАП в зоне нечувствительности АЭП определять длительность интервала времени распространения ультразвукового сигнала до этого АЭП по выражению

$$t_{x1} = t_{\text{сумм}} - t_{x2}, \quad (7)$$

где $t_{\text{сумм}} = \int_0^{x_0} \frac{dx}{V_{\text{уз}}(x)}$ — время, за которое ультразвуковая волна распространилась бы от обмотки 8 до обмотки 10 и которое определяется как сумма любых значений времен t_{x1} и t_{x2} , соответствующих одному любому положению ЭАП вне зоны нечувствительности АЭП. Погрешность вычисления величины t_{x1} зависит от постоянства значения величины $t_{\text{сумм}}$ во всем диапазоне преобразуемого перемещения. Уменьшить влияние затухания ультразвуковой волны при ее распространении на постоянство значения времени $t_{\text{сумм}}$ при любом положении подвижного элемента позволяет применение схемы усилителя-формирователя с регулированием порога срабатывания аналогового компаратора по амплитуде сигнала с АЭП [4].

Для минимизации температурной зависимости расстояния между ПРС подвижного элемента и расстояния между неподвижны-

ми ПРС необходимо изготавливать элементы конструкции, на которых размещаются ПРС, из материала, обладающего наименьшим температурным коэффициентом расширения.

4. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Исходной информацией для уточнения статической характеристики ПМПП является массив значений кода N_T , каждый элемент которого сопоставлен некоторому значению кода N_{x1} . Все значения кода N_{x1} , получаемые после выполнения цикла преобразования, можно обозначить в виде $N_{x1i} = N_{x1.\text{min}} + (i - 1)$, где i — целое положительное число, $N_{x1.\text{min}}$ — значение кода N_{x1} при координате $x_{\text{ко}}$ положения магнита 5 (см. рис. 2), равной нижнему пределу преобразования $x_{\text{ко.min}}$. Значения кода N_{x2} , полученные в том же цикле работы, что и код N_{x1i} , обозначаются N_{x2i} . Для равномерного распределения этих значений по диапазону преобразования весь диапазон изменения значения кода N_{x1} от $N_{x1.\text{min}}$ до $N_{x1.\text{max}}$ условно можно поделить на поддиапазоны протяженностью, равной некоторому постоянному числу K . В случае, если значения кода N_{x1} , полученные в текущем и предыдущем циклах преобразования, принадлежат различным подынтервалам диапазона значений, то вычисляется значение кода N_T : $N_{Tj} = N_{x2i} - N_{x1i}$, соответствующее j -му поддиапазону, которому принадлежит значение кода N_{x1i} . Для каждого j -го значения кода N_{Tj} вычисляется величина

$$\bar{V}_{\text{уз}j} = \frac{x_T}{N_{Tj} t_p}, \quad (8)$$

которая является средней скоростью УЗ волны на участке звукопровода протяженностью x_T с некоторой координатой $x_{\text{ко}j}$ начальной точки.

При проведении предварительной подготовки МПП осуществляется перемещение подвижного элемента ПМПП из точки нижнего предела диапазона преобразования в точку верхнего предела со скоростью не более некоторого предельного значения $V_{\text{пэ.max}}$, после чего вычисляется средняя скорость $V'_{\text{уз}j}$ для каждого j -го поддиапазона значения кода N_{x1} :

$$V'_{\text{уз}j} = \frac{\sum_{k=p}^q \bar{V}_{\text{уз}k}}{q - p + 1}, \quad (9)$$

где k — индекс, аналогичный индексу j ; p и q — соответственно максимальное и мини-

мальные значения из индексов k , удовлетворяющих условию $k \leq j < k + N_{Tk}$ или $N_{x1k} \leq N_{x1j} < N_{x1k} + N_{Tk}$. Другими словами, для вычисления V'_{y3j} используются все значения \bar{V}_{y3j} , найденные при таких значениях $x_{кок}$ координаты $x_{ко}$, когда $x_{кок} \leq x_{коj} < x_{кок} + x_T$.

Значение координаты $x'_{коi}$, соответствующей некоторому значению кода N_{x1i} , равняется

$$x'_{коi} = \begin{cases} x_{ко.min} + it_p V'_{y31}; & i < K; \\ x_{ко.min} + \sum_{j=1}^{n-1} t'_p V'_{y3j} + mt_p V'_{y3n}; & i \geq K, \end{cases} \quad (10)$$

где $t'_p = Kt_p$, $n = E\left(\frac{i}{K}\right)$ и $m = i - nK$.

Известным значениям координат $x_{ко.min}$ и $x_{ко.max}$ нижнего и верхнего пределов диапазона преобразования ставятся в соответствие коды $N_{x1.min}$ и $N_{x1.max}$. Из двух уравнений вида (9) составляется система, которая решается относительно тестовой величины x_T линейного расстояния. В режиме измерения по значению кода N_{x1} с помощью уравнения (9) определяется текущее положение $x'_{ко}$ контролируемого объекта, а также осуществляется периодическое обновление значений кода N_{Tj} и пересчет статической характеристики ПМПП.

С помощью математического пакета Maple V было выполнено моделирование работы МПП с тестовой величиной линейного расстояния 1 м. Исходными данными моделирования являлась систематическая погрешность, включающая в себя составляющие, вызванные непостоянством скорости распространения ультразвуковой волны, затуханием ультразвуковой волны при распространении и задержкой распространения сигнала. Максимальное значение первой составляющей погрешности преобразования равнялось 1,5 мм, максимальное значение суммы второй и третьей составляющих погрешности преобразования равнялось 9 мм. При моделировании влияние различных случайных составляющих погрешности преобразования МПП не учитывалось. Поэтому здесь и далее оценка исходных погрешностей и погрешности преобразования, полученной в результате моделирования, произведена только с помощью математического ожидания значения погрешности. Результаты моделирования подтверждают, что применение тестовой величины линейного расстояния позволяет уменьшить

все три исходные составляющие систематической погрешности преобразования, а при значениях параметров $x_T = 0,01$ м, $K = 2$, $t_p = 2$ нс систематическая погрешность МПП не превышает по модулю 0,0009% от диапазона преобразования (9 мкм по абсолютному значению).

При названных выше значениях параметров t_p , x_T и K перемещение подвижного элемента ПМПП во время предварительной подготовки преобразователя допускается с максимальной скоростью $V_{пэ.max} = 0,152$ м/с, максимальное время однократного полного (с пересчетом статической характеристики) выполнения цикла измерения составляет $t_{изм1} = 3,435$ с, максимальное время однократного сокращенного (без пересчета статической характеристики) выполнения цикла измерения равняется $t_{изм2} = 0,049$ с. Приблизительное значение количества n_3 элементов массива V'_{y3j} , определяющее необходимый объем запоминающего устройства электронного блока обработки информации, равняется 20000.

5. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ОБМОТОК И ПЕРЕКОС ЗВУКОПРОВОДА

Величина погрешности, вызванной воздействием магнитного поля и перекосом звукопровода, зависит от порогового уровня срабатывания аналогового компаратора и искажения формы сигнала на выходе АЭП:

$$\Delta x_{пом} = V_{y3}(t_\phi - t'_\phi), \quad (11)$$

где t_ϕ и t'_ϕ — моменты формирования импульса напряжения аналоговым компаратором при достижении уровня порогового напряжения $U_{пор}$ мгновенным значением искаженного и искаженного сигнала, V_{y3} — среднее значение скорости ультразвука.

Согласно разработанной математической модели информативная составляющая ЭДС, наводимой в первой обмотке при отсутствии искажений, равняется [5]

$$e_1(t) = W \sum_{i=1}^n e_{в1} \left(t - \frac{(i-1)d}{V_{y3}} \right), \quad (12)$$

где W — количество слоев обмотки, n — количество витков в одном слое обмотки, d — расстояние между витками обмотки, $e_{в1}(t) = -l_3 l_4 \frac{d\Delta B_{y3}(t,x)}{dt}$ — ЭДС сигнала, наводимая в одном витке первой обмотки, где l_3 и l_4 — высота и ширина звукопровода, $\Delta B_{y3}(t,x)$ —

функция времени t и координаты x , описывающая изменение индукции магнитного поля при прохождении ультразвукового сигнала в сечении звукопровода.

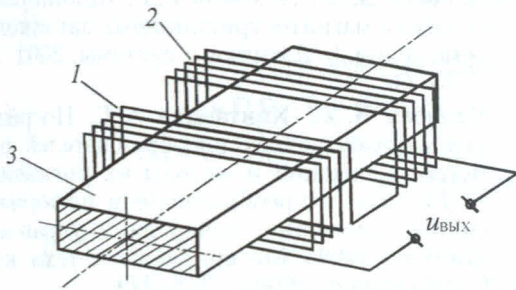


Рис. 3. Схема АЭП с двумя компенсационными обмотками: 1 — первая обмотка; 2 — вторая обмотка; 3 — магнитоотрицательный звукопровод

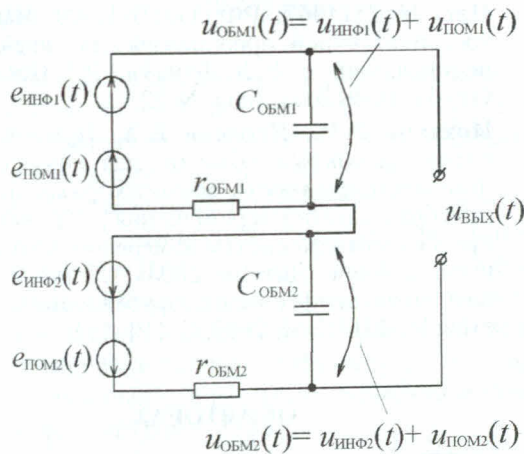


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема первой и второй компенсационных обмоток

В математической модели магнитное поле, воздействие которого приводит к искажению сигнала, является гармоническим и имеет такую амплитуду напряженности, что магнитная индукция в магнитоотрицательном материале не достигает значения индукции насыщения B_s . На рис. 3 и 4 показаны схема АЭП с компенсационными обмотками и эквивалентная электрическая схема этих обмоток. Помеха, неинформативная составляющая ЭДС, в любой из компенсационных обмоток составляет

$$e_{\text{пом}}(t) = E_{\text{пом.мах}} \cos(2\pi f_{\text{пом}} t + \varphi_{0\text{пом}}), \quad (13)$$

где $f_{\text{пом}}$ — частота гармонического магнитного поля помехи; $\varphi_{0\text{пом}}$ — начальная фаза ЭДС помехи; $E_{\text{пом.мах}}$ — амплитуда ЭДС сигнала

помехи,

$$E_{\text{пом.мах}} = -0,8W n\pi B_s f_{\text{пом}} \frac{1}{\mu} \times \left(\frac{l_3 l_4}{\cos \alpha} (\mu - 1) + l_1 l_2 \right) \times (\cos \varphi \cos \alpha + \sin \varphi \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta + \sin \varphi \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta); \quad (14)$$

μ — относительная магнитная проницаемость материала звукопровода; l_1, l_2 — высота и ширина витка обмоток; α, β, γ и φ — значения углов, характеризующих перекося витков обмотки и направление вектора напряженности магнитного поля помехи относительно оси x (рис. 5 и 6). Напряжения сигнала и помехи на выходе АЭП могут определяться с помощью теории переходных электрических процессов и комплексного метода анализа цепей переменного тока с учетом эквивалентных сопротивлений и емкостей первой и второй обмоток $C_{\text{обм1}}, C_{\text{обм2}}, r_{\text{обм1}}, r_{\text{обм2}}$ (рис. 4).

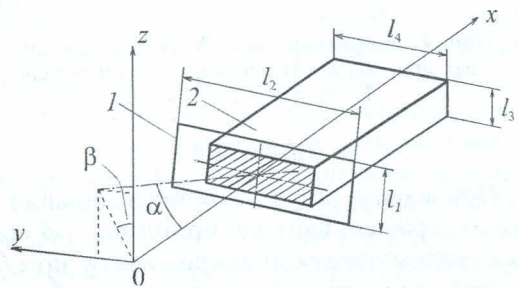


Рис. 5. Перекося витка обмотки относительно оси x : 1 — виток обмотки; 2 — магнитоотрицательный звукопровод

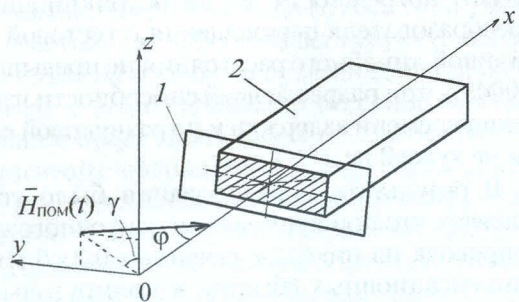


Рис. 6. Ориентация вектора напряженности магнитного поля помехи относительно оси x : 1 — виток обмотки; 2 — магнитоотрицательный звукопровод

Такие механические воздействия, как вибрация и удары, приводят к движению и перекося звукопровода относительно обмотки АЭП. При перекося звукопровода в плоскости xOy на угол α информативная ЭДС в одном

витке равняется

$$e_{в1}(t) = -l_3 \operatorname{ctg} \alpha \frac{d}{dt} \int_{x_{в2}}^{x_{в1}} \Delta B_{y3}(x, t) dx, \quad (15)$$

где $x_{в1}$ и $x_{в2}$ — значения координаты x в местах пересечения плоскости витка и боковых поверхностей звукопровода. Аналитическое выражение для ЭДС искаженного сигнала в обмотке определяется по выражению (11).

На рис. 7 показаны формы выходного сигнала АЭП для различных значений угла перекоса звукопровода.

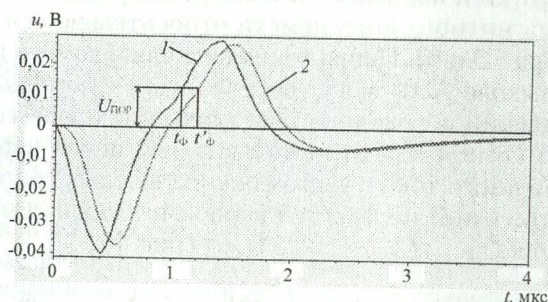


Рис. 7. Формы сигнала АЭП при различных значениях угла α перекоса звукопровода: 1 — $\alpha = 0^\circ$; 2 — $\alpha = 10^\circ$

ВЫВОДЫ

Приведены результаты исследования ранее не применявшегося принципа уменьшения систематической погрешности преобразования магнитострикционных преобразователей перемещения, основанного на подаче на вход преобразователя тестовой величины линейного расстояния. Значение систематической погрешности магнитострикционного преобразователя перемещения с тестовой величиной линейного расстояния не превышает 0,0009% при разрешающей способности измерения времени задержки ультразвуковой волны не хуже 2 нс.

В результате моделирования было установлено, что при применении ленточного звукопровода из никеля с сечением 0,2×6 мм и компенсационных обмоток с прямоугольными витками высотой 2 и шириной 8 мм для обеспечения максимального значения составляющей погрешности 1 мкм значение угла несоосности обмоток не должно превышать $\alpha = 3'$ при частоте магнитного поля $f_{\text{пом}} = 10$ МГц и $\alpha = 43'$ при частоте $f_{\text{пом}} = 1$ кГц, а случайная составляющая погрешности, вызванная перекосом звукопровода не превыша-

ет значения 1 мкм при углах перекоса звукопровода не более $\alpha = 5''$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясовеев В. Х., Исаков Р. Р. Принципы построения магнитострикционных датчиков перемещения // Датчики и системы. 2001. № 3. С. 53–60.
2. Ясовеев В. Х., Квитанцев А. С. Погрешности ультразвуковых преобразователей параметров движения и методы их уменьшения // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик–2000»: Матер. XII науч.-техн. конф. Симферополь, 2000. С. 278–279.
3. Ясовеев В. Х., Исаков Р. Р. Моделирование магнитострикционного преобразователя перемещения с коррекцией погрешности от нелинейности статической характеристики // Датчики и системы. 2002. № 1. С. 14–17.
4. Пат. № 2171967. РФ, G01B 17/00. Магнитострикционный преобразователь линейных перемещений / В. Х. Ясовеев, Р. Р. Исаков. Оpubл. 10.08.2001. Бюл. № 22.
5. Исаков Р. Р., Ясовеев В. Х. Применение компенсационных обмоток для повышения помехозащищенности магнитострикционных преобразователей перемещения // Датчики и преобразователи систем измерения, контроля и управления «Датчик–2003»: Сб. матер. XV науч.-техн. конф. с участ. зарубежн. специалистов. М.: МГИЭМ, 2003. С. 119–121.

ОБ АВТОРАХ



Ясовеев Васих Хаматович, проф. каф. информац.-измерит. техники. Дипл. инж.-электромех. (УГАТУ, 1975). Д-р техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. датчиков и преобразователей информации.



Исаков Руслан Рауфович, ст. преп. той же кафедры. Дипл. инж.-электр. (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по элементам и устройствам выч. техники и систем управления (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. датчиков и преобразователей информации.