

УДК 681.3.06

В. Х. ЯСОВЕЕВ

## МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрены принципы построения магнитострикционных преобразователей перемещений, их математические модели, основные характеристики, методы повышения точности и расширения функциональных возможностей. *Первичный преобразователь; магнитострикционный эффект; математическая модель; основные характеристики*

### ВВЕДЕНИЕ

При разработке систем управления различными объектами особая роль отводится средствам получения первичной информации о функционировании этих объектов. Именно наличие или отсутствие таких эффективных средств является часто определяющим фактором, характеризующим успешность работы той или иной системы управления.

В общем комплексе датчиковой аппаратуры систем управления важная роль принадлежит устройствам, преобразующим параметры движения (перемещение, скорость, ускорение) в электрический сигнал. Это устройства преобразования положения электрогидроприводов исполнительных устройств, измерители уровня количества топлива в баках летательных аппаратов и ряд других [1].

Среди них важное место занимает сравнительно новый подкласс преобразователей — магнитострикционные волноводные преобразователи параметров движения МВПД.

### 1. ЭЛЕМЕНТЫ МВПД И ПРИНЦИП ИХ ДЕЙСТВИЯ

Действие МВПД основано на эффектах магнитострикции: прямом (механическая деформация магнитострикционного материала при воздействии на него магнитного поля) и обратном (изменение намагниченности материала при его механической деформации). Чувствительным элементом базовой структурной схемы МВПД (рис. 1) является первичный магнитострикционный преобразователь перемещений ПМПП, представляющий собой прямолинейный звукопровод 1 из отрезка проволоки, трубки, ленты или стержня из магнитострикционного материала, неподвижно расположенный на звуко-

проводе входной возбуждающий электроакустический преобразователь ЭАП 2, выходной ЭАП 3, перемещающийся вдоль звукопровода вместе с контролируемым объектом, и акустические демпферы 4 и 5, в которые заключены концы звукопровода.

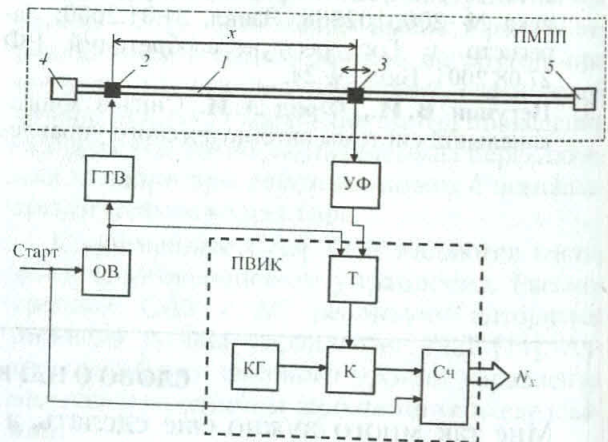


Рис. 1. Базовая структурная схема магнитострикционного волноводного преобразователя параметров движения

Принцип работы МВПД заключается в преобразовании линейного положения контролируемого объекта во временной интервал, равный времени распространения ультразвуковой УЗ волны по магнитострикционному звукопроводу от входного до выходного ЭАП. Возбуждение УЗ волны происходит при подаче в ЭАП 2 импульса от генератора тока возбуждения ГТВ, управляемого одновибратором ОБ. Через время задержки

$$t_x = \frac{x}{V_0} = S_1 x, \quad (1)$$

где  $V_0$  — скорость ультразвука,  $S_1$  — чувствительность ПМПП, в приемном ЭАП наводится импульс ЭДС, преобразуемый усилителем

формирователем УФ в прямоугольный импульс напряжения цифрового уровня. Интервал времени  $t_x$  измеряется преобразователем временных интервалов в код ПВИК путем подсчета счетчиком Сч количества импульсов  $N_x$  с кварцевого генератора КГ, поступающих через ключ К в течение этого интервала времени:

$$N_x = t_x f_{\text{КГ}} = S_1 x f_{\text{КГ}} = S_1 S_2 x = Sx, \quad (2)$$

где  $f_{\text{КГ}}$  — частота импульсов кварцевого генератора,  $S_2$  — чувствительность ПВИК,  $S$  — чувствительность МВПД. Управление ключом осуществляет триггер Т, который устанавливается по импульсу одновибратора и опрокидывается по импульсу усилителя-формирователя.

Таким образом, результат измерения перемещения представляется дискретной величиной  $N_x$ , а само измеряемое перемещение  $x$  выражается в виде

$$x = N_x \cdot x_{\text{разр}}, \quad (3)$$

где  $x_{\text{разр}} = \frac{V_0}{f_{\text{КГ}}}$  — разрешающая способность МВПД по перемещению.

Магнотриксционный материал звукопровода должен обладать достаточной эффективностью электромеханического преобразования и малым коэффициентом ослабления УЗ колебаний. В настоящее время наиболее приемлемыми материалами для изготовления магнотриксционных звукопроводов являются никель НН-2Т, магнотриксционные сплавы 49К2Ф, 49К2Ф-ВЦ, 9Ю-ВИ, 65К, алфер (13% — Al, 87% — Fe), пермаллой-40 (40% — Ni, 60% — Fe), элинвары 42НХТЮ и 44НХТЮА, 44НХМТ, 45НХТ и другие. Весьма перспективно применение аморфных материалов.

Все ЭАП для возбуждения и регистрации УЗ волн в магнотриксционных звукопроводах можно подразделить на электро-механические (контактные) и электромагнитные (бесконтактные). Также в зависимости от конструкции ЭАП в звукопроводе ПМШ могут возбуждаться продольные или крутильные волны. Продольная УЗ волна представляет собой локальную механическую деформацию в направлении, совпадающем с продольной осью звукопровода, и обладает скоростью распространения около 5000 м/с. Возбуждение продольных УЗ волн осуществляется только электромагнитными ЭАП, в которых постоянное магнитное поле поляризующего магнита и магнитное поле, создаваемое

импульсом тока, воздействуют непосредственно на звукопровод. Наиболее часто используемая конструкция ЭАП для возбуждения и регистрации продольных волн представляет собой охватывающую звукопровод 1 многослойную катушку, намотанную на каркас [2]. Для усиления прямого и обратного магнотриксционного эффекта применяется поляризующий магнит. Поток магнитного поля, создаваемый протекающим через обмотку импульсом тока, проходя через звукопровод, вызывает в нем вследствие прямого магнотриксционного эффекта волну упругой механической деформации. Изменение намагниченности материала звукопровода в зоне упругой деформации приводит вследствие обратного магнотриксционного эффекта к наведению импульса ЭДС в обмотке приемного ЭАП.

Крутильная УЗ волна представляет собой упругую волну локальной деформации кручения звукопровода вокруг его продольной оси с направлением распространения вдоль этой оси. Скорость крутильной волны в разных магнотриксционных материалах колеблется около значения 3000 м/с, поэтому МВПД с возбуждением крутильных УЗ волн по сравнению с работающими на продольных волнах обладают более высокой чувствительностью и лучшей разрешающей способностью.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МВПД

Рассмотрим возбуждение ультразвуковых волн в магнотриксционном волноводе круглого и прямоугольного сечения (ленте).

Введем в рассмотрение две постоянные времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Величина  $\tau_1$  характеризует скорость изменения магнитного потока во времени и определяет максимально достижимое механическое напряжения в волноводе.

Величина  $\tau_2$  характеризует время установления тока возбуждения.

Обобщенным параметром, характеризующим крутизну фронта сигнала возбуждения, является безразмерная величина, представляющая собой отношение постоянной времени  $\tau_1$  к  $\tau_2$ .

Получена формула, описывающая форму возбуждения ультразвуковой волны в волноводе [3]:

$$\sigma\left(\frac{t}{\tau_1}\right) = \frac{a\Phi_0}{VS} \int_0^{t_1} \frac{\partial h\left(\frac{t}{\tau_1} - \frac{t^*}{\tau_1}\right)}{\partial\left(\frac{t}{\tau_1}\right)} d\left(\frac{t^*}{\tau_1}\right), \quad (4)$$

где  $a$  — чувствительность ЭАП как излучателя,  $\Phi_0$  — установившееся значение магнитного потока,  $V$  — скорость ультразвуковой волны,  $S$  — площадь поперечного сечения волновода.

Проанализированы зависимости механического напряжения при возбуждении импульсом тока, изменяющимся по закону  $i(t) = Im(1 - e^{-t/\tau_2})$ .

На рис. 2 представлены зависимости относительных значений механических напряжений от времени при различных значениях  $\tau_1/\tau_2$ .

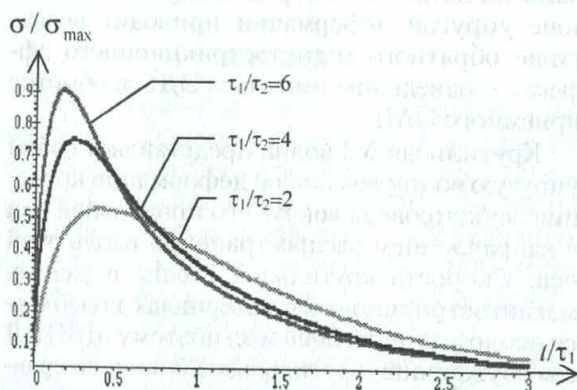


Рис. 2. Зависимость механического напряжения от  $t$

Установлено, что увеличению отношения  $\tau_1/\tau_2$  с 2 до 6 приводит к увеличению амплитуды ультразвуковой волны на 80%, а увеличение  $\tau_1/\tau_2$  с 4 до 6 — на 20%, поэтому величину  $\tau_1/\tau_2$  целесообразно ограничивать выбором в интервале от 4 до 6.

Рассмотрим влияние свойств ферромагнитных материалов волноводов на прохождение ультразвуковой волны.

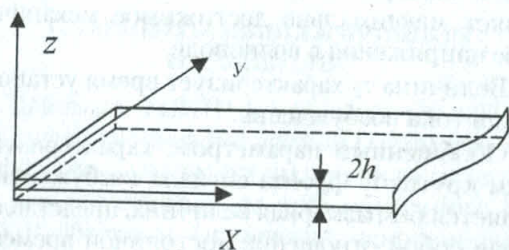


Рис. 3. К расчету скорости волн в ленточном волноводе

Система волновых дифференциальных уравнений, описывающих волны в ленточном волноводе (рис. 3), имеет вид:

$$\begin{aligned} \partial^2 U / \partial X^2 + \partial^2 U / \partial Z^2 + K_1^2 U &= 0; \\ \partial^2 W / \partial X^2 + \partial^2 W / \partial Z^2 + K_2^2 W &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $U$  и  $W$  — потенциалы смещения частиц продольных и сдвиговых волн в волноводе;

$$K_1 = 2\pi f \sqrt{\frac{\rho(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{E(1-\nu)}},$$

$$K_2 = 2\pi f \sqrt{\frac{2\rho(1+\nu)}{E}}$$

— волновые числа для продольных и поперечных волн соответственно,  $\rho$  — плотность материала волновода,  $f$  — частота волн,  $E$  — модуль упругости;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Получено численное решение дисперсионного уравнения и аппроксимировано с погрешностью менее 0,04% при  $2hf/v_2 < 0,3$ :

$$\frac{V}{V_{пл}} = B_1 + B_2 \left( \frac{2hf}{V_2} \right) + B_3 \left( \frac{2hf}{V_2} \right)^2, \quad (6)$$

где  $V_{пл} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+\nu)(1-\nu)}}$ ;  $V_2 = V_{пл} \sqrt{\frac{(1-\nu)}{2}}$ .

Введение безразмерной величины  $2hf/v_2$  позволяет использовать полученное решение при разных значениях толщины волновода  $2h$ , разных частотах и модулях упругости  $E$ , зависящих от температуры и подмагничивания.

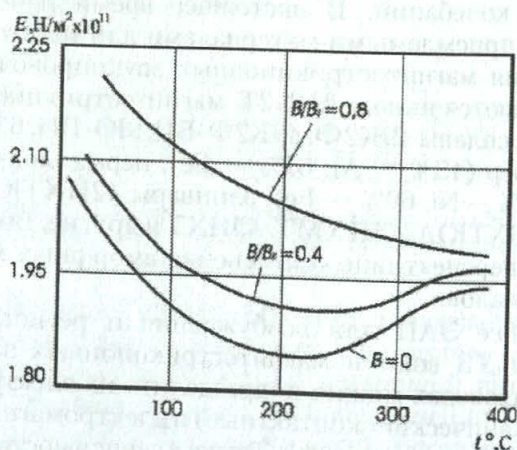


Рис. 4. Изменение модуля упругости от индукции магнитного поля для волновода из никеля

На рис. 4 приведены зависимости модуля упругости для никеля при различных индукциях подмагничивающего поля и температуры. На основе этих данных были построены зависимости относительной фазовой скорости при различных значениях модуля упругости  $E$  (рис. 5).

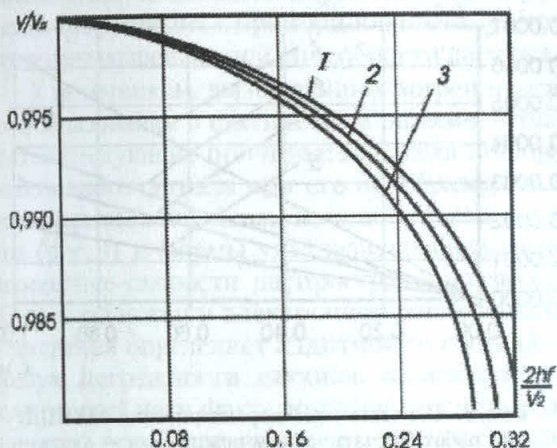


Рис. 5. Изменение скорости волн от модуля упругости и параметра  $2hf/v_2$ : 1 —  $E = 2,0 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>; 2 —  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>; 3 —  $E = 2,2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>

Рассмотрим распространение волны механической деформации в цилиндрическом волноводе (рис. 6).

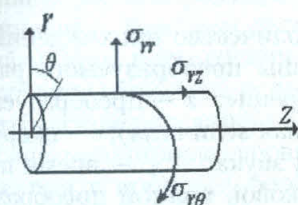


Рис. 6. К расчету распространения волн в цилиндрическом волноводе

Волновые уравнения Похгаммера в цилиндрических координатах имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 U_r}{\partial t^2} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \Delta}{\partial r} - \frac{2\mu}{r} \frac{\partial \varpi_z}{\partial \theta} + 2\mu \frac{\partial \varpi_\theta}{\partial z}; \\ \rho \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial t^2} &= (\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta}{\partial \theta} - 2\mu \frac{\partial \varpi_z}{\partial z} + 2\mu \frac{\partial \varpi_r}{\partial r}; \\ \rho \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} - \frac{2\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varpi_\theta) + \\ &+ \frac{2\mu}{r} \frac{\partial \varpi_r}{\partial \theta}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\Delta = \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{1}{r} U_r$  — относительное изменение объема.

Дисперсионное уравнение было решено численным методом. Решение при  $a/\lambda < 0,37$ , где  $a$  — радиус волновода,  $\lambda$  — длина волны, было аппроксимировано полиномом

$$\frac{C}{C_0} = b_2 \left(\frac{2a}{\Lambda}\right)^2 + b_1 \left(\frac{2a}{\Lambda}\right) + b_0, \quad (8)$$

где  $C_0 = \sqrt{E/\rho}$ ,  $\rho$  — плотность материала;  $\lambda$ ,  $\mu$  — постоянные Ламе.

Для измерительной обмотки, имеющей конечные линейные размеры, ЭДС имеет вид [3]

$$e(t) = -W_2 S \Lambda \frac{d}{dt^*} \int_0^{t_2} \sigma \left(\frac{t^*}{\tau_1}\right) dt^*, \quad (9)$$

где  $t_2$  — время, за которое ультразвуковая волна проходит всю длину измерительной обмотки,  $W_2$  — число витков измерительной обмотки,  $S$  — поперечное сечение волновода,  $\Lambda$  — чувствительность ЭАП как приемника.

На рис. 7 представлена зависимость относительной ЭДС от параметра  $t/\tau_1$  при различных сочетаниях постоянной времени установления магнитного потока в волноводе с учетом вихревых токов к постоянной времени установления тока возбуждения.

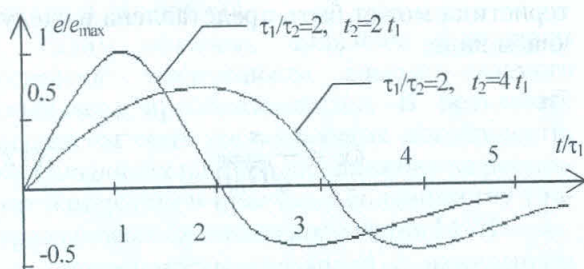


Рис. 7. Зависимость выходной ЭДС от параметра  $t/\tau_1$

Из анализа приведенных графиков следует, что с увеличением длины приемной катушки увеличивается длительность принимаемого сигнала и уменьшается крутизна нарастания фронта сигнала. При увеличении длины катушки в 2 раза крутизна фронта выходного сигнала уменьшается в 1,6 раза.

### 3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МВПД

Статические характеристики определяются уравнением преобразования и зависят от входного перемещения, способа образования временного интервала (использования волны прямого хода или отраженных волн) и типа ультразвуковых волн (продольные или крутильные).

Статические характеристики ПМП при использовании продольных волн и цилиндрического волновода имеют вид

$$t_X = \frac{x}{\sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[ b_0 + b_1 \frac{2R}{\lambda} + b_2 \left(\frac{2R}{\lambda}\right)^2 \right]}, \quad (10)$$

где  $b_0, b_1, b_2$  — коэффициенты аппроксимации;  $R$  — радиус волновода;  $\lambda$  — длина волны;  $E$  — модуль упругости материала звукопровода;  $\rho$  — плотность материала звукопровода.

При использовании волновода прямоугольного сечения (ленты) статическая характеристика определяется выражением

$$t_X = \frac{x}{V_{пл} \left[ B_1 + B_2 \frac{2hf}{V_2} + B_3 \left( \frac{2hf}{V_2} \right)^2 \right]}, \quad (11)$$

где  $B_1, B_2, B_3$  — коэффициенты аппроксимации;  $2h$  — толщина ленточного звукопровода;  $V$  — коэффициент Пуассона;  $f$  — частота волны.

При использовании крутильных волн нулевой моды, которые распространяются в звукопроводе без дисперсии, статическая характеристика может быть представлена в следующем виде:

$$t_X = \frac{x}{\sqrt{G/\rho}}, \quad (12)$$

где  $G$  — модуль сдвига,  $\rho$  — плотность материала.

На полюсу неопределенности статических характеристик в основном будут влиять неточность задания значений модуля упругости и плотности материала, поэтому МВПД относятся к индивидуально градуируемым средствам. Наиболее часто используются следующие схемы излучения и приема ультразвуковых волн при измерении положения объекта: а) неподвижный излучатель, подвижный приемник, б) подвижный излучатель, неподвижный приемник, в) неподвижный преобразователь, подвижный отражатель ультразвуковых волн, г) подвижный преобразователь, неподвижный отражатель ультразвуковых волн.

Передаточные характеристики указанных схем приведены на рис. 8. На передаточную характеристику МВПД влияют конструкции первичного преобразователя, скорость распространения звука, время задержки в электронной части в цепи измерения, непостоянство скорости звука по длине волновода. Кроме того, передаточная характеристика зависит от используемого в нем типа волн: продольных или крутильных.

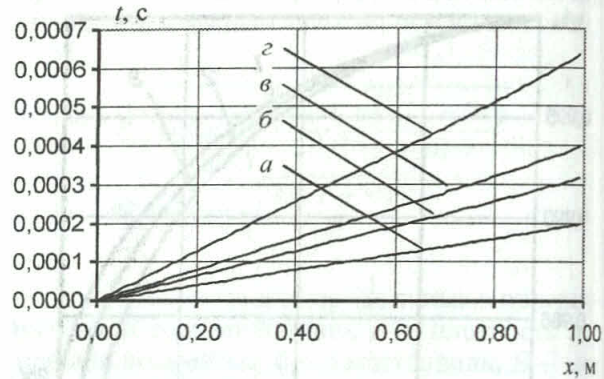


Рис. 8. Передаточная характеристика МВПД при работе в статическом режиме: а — на продольных волнах по схеме а и б; б — на крутильных волнах по схеме а и б; в — на продольных волнах по схеме в и з; з — на крутильных волнах по схеме в и з

В общем случае передаточная характеристика представляется в следующем виде:

$$t_X = k \frac{x}{c} + t_3, \quad (13)$$

где  $k$  — количество прохождений ультразвуковой волны преобразуемого расстояния за одно измерение;  $x$  — преобразуемое расстояние (входная величина);  $c$  — скорость распространения звука;  $t_X$  — время прохождения ультразвуковой волной преобразуемого расстояния  $x$ ;  $t_3$  — постоянная составляющая времени задержки в электронной части цепи измерения.

В случае равномерного движения полученный результат преобразования описывается формулой

$$x(t_2) = x(t_1) + v \left[ t_3 + \frac{x(t_1)}{c} \right] + t_3 c, \quad (14)$$

где  $x(t_1)$  и  $x(t_2)$  — положение объекта в начале и при окончании преобразования.

Передаточная функция описывается как звено чистого запаздывания

$$H(s) = e^{-(\gamma t_{взм} + t'_3)s}, \quad (15)$$

где  $\gamma = (1 + v/c)$ ;  $t'_3 = t_3(c + v)$  — время задержки в электронной части канала измерения при работе в динамическом режиме.

Чувствительность датчика положения возрастает при увеличении количества проходов ультразвуковой волны и при снижении скорости распространения ультразвуковой волны. При преобразовании идет оцифровка выходного сигнала с первичного преобразователя с заданной дискретностью, поэтому увели-

чение чувствительности первичного преобразователя приводит к пропорциональному увеличению разрешающей способности датчика.

К источникам, вызывающим погрешности преобразования в статическом режиме, относятся следующие причины: задержка информационного сигнала при его преобразовании в измерительной цепи, изменение амплитуды (рис. 9) и формы ультразвуковой волны, изменение скорости распространения звука. Время задержки в электронной части канала измерения определяет аддитивную составляющую погрешности датчика, зависящую от следующих пяти факторов: конструкции первичного преобразователя, динамических характеристик излучателя и приемника, точности установки излучателя и приемников, задержек в схеме вторичного преобразователя, задержек в результате затухания и изменения формы ультразвуковой волны. Влияние первых четырех факторов на рассматриваемую погрешность можно значительно уменьшить, используя дифференциальную схему измерения [2]. Влияние пятого фактора устраняется предложенным с участием автора способом, заключающимся в измерении интервала времени посередине импульса, использовании схем автоматической регулировки усиления, автоматической регулировке уровня порогового напряжения в процессе формирования фронтов [3].

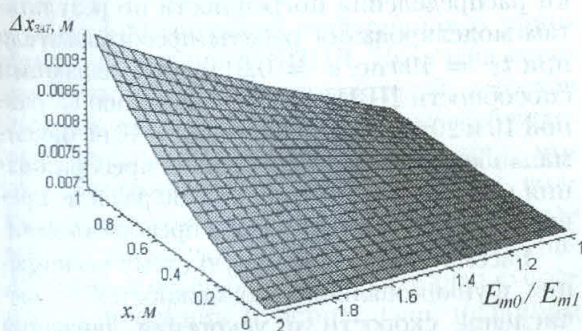


Рис. 9. Поверхность отклика зависимости  $\Delta x_{\text{зат}}$  от расстояния  $x$  и отношения  $E_{m0}/E_{m1}$

Погрешность, связанная с изменением скорости распространения звука:

$$\delta = \Delta V/V_0, \quad (16)$$

где  $V_0$  — заданное значение скорости звука при нормальных условиях,  $\Delta V = (V - V_0)$  — отличие текущего значения скорости звука от заданного.

Скорость звука непосредственно определяет масштаб измерений, а ее непостоянство

приводит к мультипликативной погрешности. При отсутствии специальных методов коррекции эта погрешность может достигать значений 0,3...2,5%.

Для уменьшения рассмотренной погрешности применяют: логометрический метод измерения — определение положения объекта по отношению к эталонному расстоянию — и способ, предложенный автором: подстройку скорости распространения звука путем изменения частоты излучаемой волны и путем изменения подмагничивающего поля [3]. Погрешность от неоднородности акустического сопротивления волновода составит

$$\Delta x_{\text{н}} = \int_0^x \left(1 - \frac{V_0}{V(x)}\right) dx, \quad (17)$$

где  $V_0$  — среднее значение скорости звука в волноводе,  $V(x)$  — зависимость скорости звука вдоль волновода.

Таким образом, выявлены источники основной погрешности рассматриваемого подкласса преобразователей. В результате выделены семь составляющих погрешности, оказывающих наибольшее влияние на результат измерений и присущих большинству ультразвуковых датчиков положения [4, 5]:

- погрешность, связанная с изменением скорости распространения звука;
- погрешность квантования;
- погрешность, связанная с затуханием ультразвуковой волны;
- погрешность, связанная с задержками излучающего и приемного трактов;
- динамическая погрешность;
- погрешность, связанная с неоднородностью волнового сопротивления;
- погрешности, связанные с воздействием помех.

## 5. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Способы коррекции погрешности МВПД условно подразделяются на конструктивно-технологические, алгоритмические и комбинированные.

Алгоритмические, в свою очередь, делятся на схемотехнические, реализуемые только на уровне электронной схемы устройства обработки информации с ПМПП, и программные, которые можно осуществить как на уровне электронной схемы, так и с помощью программируемого цифрового блока.

Рассмотрим структурную схему МВПД с коррекцией нелинейности характеристики путем подачи на вход тестового смещения, представленную на рис. 10 [6].

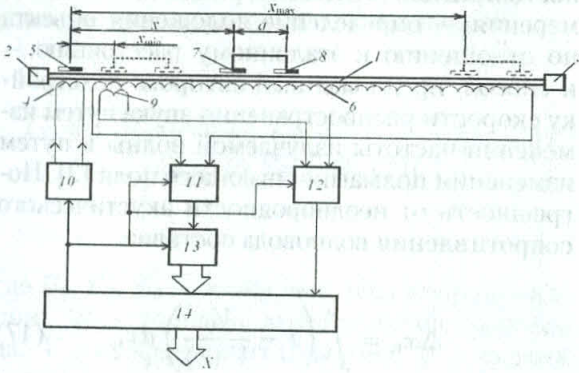


Рис. 10. Структурная схема магнестрикционного волноводного преобразователя с тестовой величиной линейного смещения

На прямолинейном магнестрикционном волноводе расположен ЭАП возбуждения, состоящий из обмотки 4, охватывающей звукопровод с постоянным магнитом 5, и приемного ЭАП, который состоит из распределенной охватывающей волновод обмотки 6 и двух объединенных в блок постоянных магнитов 7 и 8, находящихся друг от друга на фиксированном расстоянии  $a$ . Положение магнита 5, излучающего ЭАП, задает начало отсчета координаты  $x$  контролируемого объекта, кинематически связанного с блоком магнитов 7 и 8. Для предотвращения отражения ультразвука концы звукопровода заключены в акустические демпферы 2 и 3.

Для компенсации погрешности от нелинейности статической характеристики преобразователя перед началом и в процессе эксплуатации происходит измерение скорости прохождения УЗ волной участков звукопровода постоянной протяженности и дальнейшая аппроксимация распределения скорости вдоль диапазона преобразования.

Значения координат  $X_i$  положения магнита 7 определяются выражением

$$X_i = \begin{cases} x_{\min} + it_p \bar{V}'_{y_{z1}} \left(1 + \frac{i}{K} \frac{z}{2}\right); & i < K, \\ x_{\min} + \sum_{j=1}^{n-1} (t_p K + \frac{z}{2} t_p) \bar{V}'_{y_{zj}} + \\ + mt_p \bar{V}'_{y_{zn}} \left(1 + \frac{i}{K} \frac{z}{2}\right); & i \geq K, \end{cases} \quad (18)$$

где  $x_{\min}$  — нижний предел преобразования;  $i$  — целочисленный индекс;  $\bar{V}'_{y_{z1}}$ ;  $\bar{V}'_{y_{zj}}$ ,

$\bar{V}'_{y_{zk}}$  — элементы массива, описывающего распределение скорости вдоль диапазона преобразования;  $t_p$  — разрешающая способность ПВИК по времени;  $K$  — целое число, от которого зависит частота взятия выборок скорости;  $n = E(i/K)$ ,  $m = i - nK$ ,

$$z = K \left( 1 - \frac{a}{t_p V_{y3} E \left( \frac{a + \frac{t_p \bar{V}'_{y3}}{2}}{t_p \bar{V}'_{y3}} \right)} \right)$$

— коэффициент, исключаяющий накопление с увеличением индекса  $i$  составляющей погрешности, вызванной тем, что в вычислениях используются квантованные значения длительностей интервалов времени. Значения кодов  $N_{xi}$  и соответствующие им значения величин  $X_i$  представляют собой табличную форму отградуированной статической характеристики (СХ) МВПД.

Для получения исходных данных моделирования — реальной СХ МВПД — было использовано распределение погрешности МВПД со звукопроводом диаметром 1 мм из сплава 44НХ5МТ при аппроксимации СХ прямой линией в диапазоне преобразования от 0 до 1 м. Значение погрешности находилось как отклонение значений  $X_i$  промежуточных точек полученной СХ преобразователя от характеристики, принимавшейся в качестве реальной. На рис. 11 приведены графики распределения погрешности по результатам моделирования работы преобразователя при  $t_V = 100$  нс,  $a = 0,01$  м и разрешающей способности ПВИК по перемещению  $t_p$ , равной 10 и 20 нс. При значении  $t_p = 10$  нс максимальное значение погрешности преобразования уменьшается примерно в 30 раз и не превышает 0,005% от диапазона преобразования.

Рассмотрим структурную схему расширения функциональных возможностей — вычисление скорости и ускорения движения контролируемого объекта с помощью схемотехнических решений, предложенных с участием автора. Первый способ вычисления скорости заключается в выборе некоторой постоянной длительности интервала времени  $t_{cm}$  и измерении  $x_{cm}$  контролируемого объекта за это время. Второй способ вычисления скорости: постоянным задается величина смещения  $x_{cm}$  контролируемого объекта, периодически измеряется положение  $x$ , определяется время  $t_{cm}$  между положениями начала циклов измерения, в которых были получены отсчеты  $N_{x1}$  и  $N_{x2}$ , удовлетворяющие условию  $(N_{x2} - N_{x1})x_{разр.} \geq x_{cm}$ .

График зависимости погрешности преобразования скорости вторым способом от скорости  $V$  и величины смещения  $x_{см}$  представлен на рис. 12.

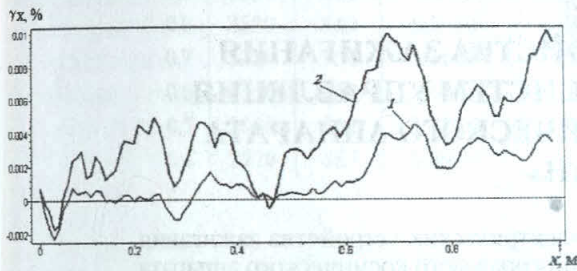


Рис. 11. Погрешности МВПД, полученные в результате моделирования при  $t_V = 100$  нс,  $a = 0,01$  м и различных значениях  $t_p$ : 1 —  $t_p = 10$  нс ( $K = 10$ ); 2 —  $t_p = 20$  нс ( $K = 5$ )

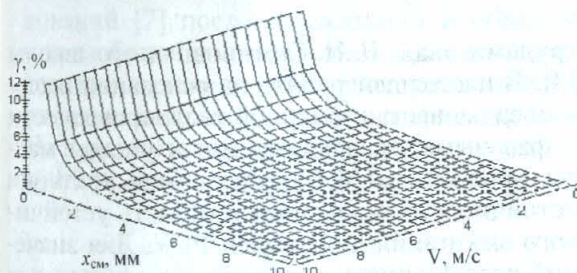


Рис. 12. График зависимости относительной погрешности вычисления скорости контроля объекта от скорости и задаваемого смещения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизирована информация о принципах построения МВПД. Получена совокупность математических моделей, в состав которых входят: модель системы возбуждения волны механической деформации, модель распространения ультразвуковой волны по ленточному и цилиндрическому волноводу, расчетная модель выходного сигнала, которые позволяют проводить анализ процессов получения измерительной информации о параметрах движения контролируемого объекта. Установлены факторы, влияющие на передаточные характеристики рассмотренных схем, и предложены методы улучшения основных характеристик. Предложены методы коррекции, позволяющие снизить погрешность фиксации интервала времени, причиной которой является затухание ультразвуковой волны, погрешность от нестабиль-

ности значения скорости звука из-за изменения температуры и непостоянства скорости распространения звука вдоль волновода. Таким образом, получила развитие научная база, используемая при проектировании МВПД, позволяющая создавать высокоэффективные магнитоотрицательные волноводные преобразователи параметров движения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясовеев В. Х. Преобразователи параметров движения на ультразвуковых волнах // Вестник УГАТУ. Уфа, 2000. № 2. С. 207–211.
2. Ясовеев В. Х., Исхаков Р. Р. Принципы построения магнитоотрицательных датчиков перемещения // Датчики и системы. 2001. № 3. С. 53–60.
3. Ясовеев В. Х. Магнитоотрицательные волноводные преобразователи параметров движения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2002. 37 с.
4. 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.
5. Ясовеев В. Х. Классификация ультразвуковых преобразователей параметров движения и методы повышения их точности // Новые методы, технические средства и технологии получения измерительной информации: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. Уфа, 1997. С. 28–29.
6. Ясовеев В. Х., Исхаков Р. Р. Моделирование магнитоотрицательного преобразователя перемещения с коррекцией погрешности от нелинейности статической характеристики // Датчики и системы. 2002. № 1. С. 14–17.

### ОБ АВТОРЕ



Ясовеев Василь Хаматович, проф. каф. информационно-измерительной техники УГАТУ. Дипл. инж.-электро-механик (УГАТУ, 1975). Д-р техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 2002). Исследования в области датчиков и преобразователей информации.