

УДК 621.317.7

О.Н. Пчелинцева, Е.С. Дёмин, С.Б. Дёмин

Математическое моделирование факторов влияния магнитострикционных преобразователей механических величин

Проведено моделирование влияний краевого и поверхностного эффектов, магнитной вязкости материала на параметры выходных сигналов магнитострикционных преобразователей перемещений и получены их предельные числовые характеристики.

Ключевые слова: математическое моделирование, факторы влияния, магнитострикционные преобразователи на волнах кручения.

Сегодня известны различные принципы возбуждения и считывания упругих ультразвуковых волн (УЗВ) в звукопроводах магнитострикционных преобразователей механических величин (МПМВ). Наиболее перспективным является метод Видемана [1–3].

Техническая реализация данного метода возбуждения УЗВ кручения в измерительных преобразователях этого вида предполагает два подхода [3]. В первом звукопровод из металлического магнитострикционного материала включается в электрическую цепь усилителя записи МПМВ, и через него проходят токовые импульсы $I_x(t)$. Во втором магнитострикционный звукопровод взаимодействует с усилителем записи МПМВ через индуктивный элемент.

В обоих случаях в зоне прямого магнитострикционного преобразования МПМВ формируется геликоидальное поле:

$$H_{хг}(t) = \sqrt{H_{хк}^2(t) + H_{оп}^2}, \quad (1)$$

которое является результирующим пространственным полем составляющих продольного магнитного поля $H_{оп}$ постоянного магнита и радиального импульсного поля $H_{хк}(t)$ записи, созданного вдоль звукопровода с током $I_x(t)$.

Напряженность $H_{хг}(t)$ (1) результирующего поля, как и его составляющие $H_{хк}(t)$, $H_{оп}$, является векторной величиной. Поэтому в зависимости от знака магнитострикции $\pm\lambda$ материала звукопровода МПМВ, полярности токового сигнала $I_x(t)$ и постоянного магнита в его среде могут быть возбуждены УЗВ кручения с разными фазами магнитострикционной деформации (сжатие-расширение и наоборот). Это, в итоге, отражается на полярности выходных электрических сигналов считывания МПМВ.

При возбуждении и считывании УЗВ в МПМВ отмеченным методом имеет место влияние денормализующих факторов, которые, как известно, снижают эффективность прямого и обратного магнитострикционных преобразований сигналов. К ним можно отнести *краевой* и *поверхностный* эффекты сигнальных преобразователей МПМВ, *магнитную вязкость* материала звукопровода [4]. Поэтому изучение их влияния на параметры информационных сигналов МПМВ является актуальным, способствуя выработке решений по улучшению их метрологических и эксплуатационных характеристик.

1. Моделирование факторов влияния МПМВ

При подаче в среду радиального звукопровода МПМВ из металлического магнитострикционного ферросплава токовых импульсов $I_x(t)$ длительности $\tau_{и}$ с частотой $f=1/T$ вокруг него образуется импульсное магнитное поле, напряженность которого уменьшается по известному закону с увеличением расстояния a от его продольной оси, т.е. $H_{хк}(t) = I_x(t) \times R / (2\pi \cdot a^2)$, где R – радиус поперечного сечения звукопровода.

Наибольшее значение напряженности магнитного поля $H_{хк}(t)$ достигается, как известно, на поверхности звукопровода при $a = R$:

$$H_{хк}^1(t) = I_x(t) \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R}, \quad (2)$$

На частотах $f \geq 0,1$ МГц возбуждения УЗВ начинает сказываться влияние поверхностного эффекта [4]. За счет его экранирующего воздействия в приповерхностном слое $Z_э$ с ростом частоты $\omega = 2\pi f$ возрастает плотность $j(t)$ тока $I_x(t)$ записи от середины сечения радиального звукопровода площадью $S = 2\pi R^2$ по закону $j(t) = I_x(t) \cdot \frac{1}{\pi[R^2 - (R - Z_э)^2]}$.

Условная толщина $Z_э$ экранирующего слоя звукопровода может быть определена из известного выражения: $Z_э = \frac{2\pi}{C_0} \sqrt{\frac{\rho_{эл} \cdot \mu}{\omega}}$, где C_0 – скорость электромагнитной волны в вакууме; $\rho_{эл}$ – удельное электрическое сопротивление; μ – магнитная проницаемость материала. При этом с ростом частоты ω значения $Z_э$ асимптотически убывают. Следовательно, с целью уменьшения влияния поверхностного эффекта на рабочих частотах МПМВ до значений $f \leq 4,5$ МГц следует выбирать материал звукопровода по возможности с большим значением $\rho_{эл}$ исходя из технических условий на проектирование.

Магнитная вязкость или дисперсия проницаемости μ материала звукопровода МПМВ проявляется через изменение намагниченности $J(t)$ в процессе его перемагничивания импульсным полем $H_{хк}^1(t)$ (2):

$$J(t) = H_{хк}^1(t) \cdot [\chi - (\chi - \chi_0) \cdot e^{-\beta_1 t_1}], \quad (3)$$

где χ, χ_0 – предельная и мгновенная восприимчивость материала звукопровода к магнитному полю; β_1 – затухание, вызванное вихревыми токами, магнитоупругим гистерезисом и релаксационными процессами материала звукопровода; t_1 – время перемагничивания. В установившемся режиме $t_1 \rightarrow \infty$ магнитная проницаемость материала звукопровода принимает значение $\mu = (1 + \chi)$.

С учетом выражений (1)–(3) в зоне активного сечения $S_{хэф}$ звукопровода МПМВ и от его поверхности на расстоянии $a1$ по закону полного тока напряженность кругового магнитного поля $H_{хк}(t)$ на частоте ω и $t_1 = Z_э / C_0$ составит:

$$H_{хк}(t) = H_{хк}^1(t) \cdot e^{-\beta_1 \cdot Z_э / C_0} = \frac{I_x(t)}{2\pi} \cdot \frac{R}{(R + a1)^2} \cdot e^{-\beta_1 \cdot Z_э / C_0}. \quad (4)$$

Значение $H_{хк}(t)$ (4) гиперболически убывает с расстоянием $a1$ от поверхности звукопровода и уменьшается с ростом частоты f возбуждения УЗВ кручения преимущественно из-за влияния поверхностного эффекта и закона изменения поля (рис. 1). Магнитная вязкость материала звукопровода МПМВ при значениях $R = (0,5 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м, его сечения заметного влияния не оказывает.

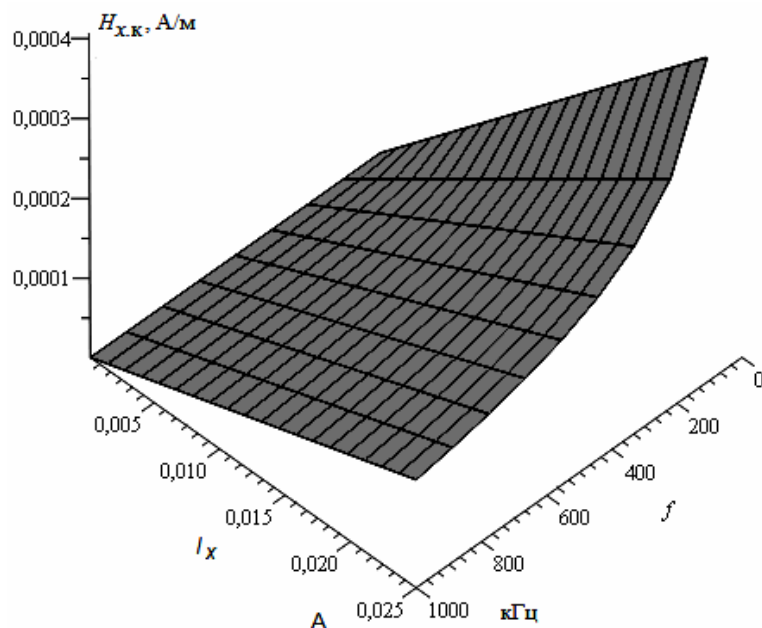
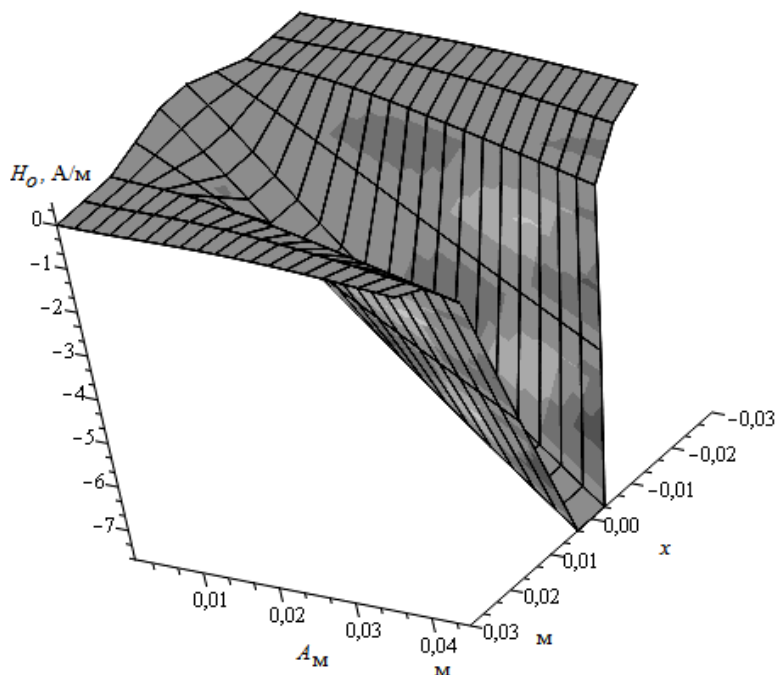


Рис. 1. Модель напряженности магнитного поля $H_{хк}(t)$ на поверхности звукопровода радиусом $R = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м при разных значениях частот f возбуждения и токах $I_x(t)$ записи МПМВ

Возбуждение УЗВ кручения, таким образом, проходит в эффективно проводящем слое звукопровода сечением $S_{хэф} = \pi \cdot Z_0(2R - Z_0)$, при подаче токового импульса $I_x(t)$ и под действием продольного поля $H_{оп}$ постоянного магнита. Его значение (рис. 2) можно найти по методу «эквивалентного соленоида», т.е.

$$H_o = \int_{A_M}^{B_M} H_{оэкв} dy,$$
 где y – координата, учитывающая поперечные размеры A_M, B_M обмотки.

Рис. 2. Модель напряженности H_o поля магнита для разных значений A_M



При отсутствии экранирующих оболочек эквивалентного соленоида на его торцах однородность магнитного поля H_o нарушается из-за влияния краевого эффекта. Он вызывает сужение диаграммы направленности поля по экспоненциальному закону

$$H_{оп} = H_o \cdot K_{кэ}, \tag{5}$$

пропорционально коэффициента краевого эффекта, определяемого из выражения:

$$K_{кэ} = \exp\left[-\pi \cdot x^2 \frac{\sqrt{A_M/(A_M + l_M)}}{l_M}\right] = \frac{l_{M.эф}}{l_M},$$
 где l_M – линейный размер магнита; $l_{M.эф}$ – размер зоны эффективного магнитострикционного преобразования; x – пространственная координата. Значение $K_{кэ}$ уменьшается с удалением магнита от поверхности звукопровода МПМВ, сужая протяженность зоны $l_{M.эф}$ (рис. 3).

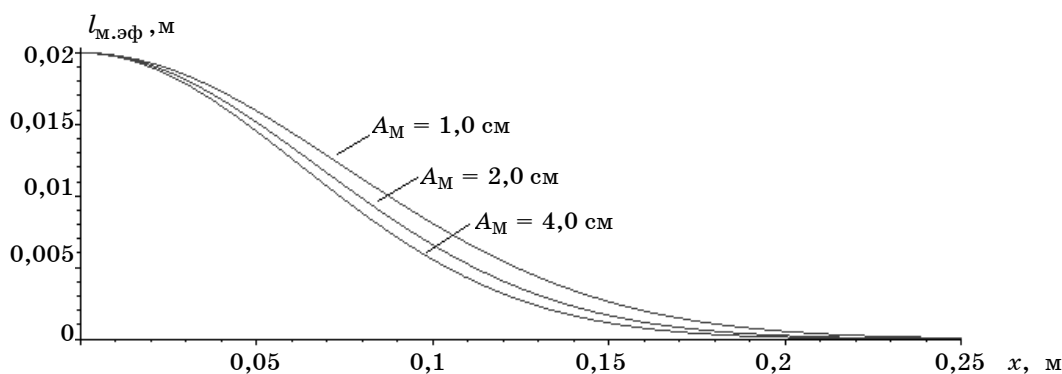


Рис. 3. Модели зоны $l_{M.эф}$ при разном удалении магнита от поверхности звукопровода $A_M \geq 2R$ и параметра $l_M \geq v_B \cdot \tau_{ц}$; v_B – фазовая скорость УЗВ

С учетом влияния поверхностного и краевого эффектов (2), (5), магнитной вязкости (4) материала звукопровода МПМВ длиной L и диаметром d можно теоретически определить напряженность $H_{хг}(t)$ (1) геликоидального поля в зоне прямого магнитострикционного преобразования (рис. 4).

Проникая в среду звукопровода на глубину Z_0 и перемещая его, наведенное геликоидальное поле $H_{x,r}(t)$ вызывает в зоне прямого магнитоэластического преобразования элементарные механические деформации $\delta_{x,i}(t)$ в виде чередующихся областей сжатия $-\sigma_i$ и растяжения $+\sigma_i$, которые в совокупности представляют УЗВ кручения (рис. 5):

$$\sigma_x(t) = \sum \delta_{x,i}(t) = \sum \lambda \cdot E \cdot K_\mu \int_{-\tau_\Pi/2}^{+\tau_\Pi/2} H_{x,r}(t) \cdot e^{-\left(\frac{\tau_\Pi - x}{2} \cdot \nu_B\right)} dt, \quad (6)$$

где E – модуль упругости 1-го рода, K_μ – коэффициент магнитной проницаемости, τ_Π – время преобразования упругой волны.

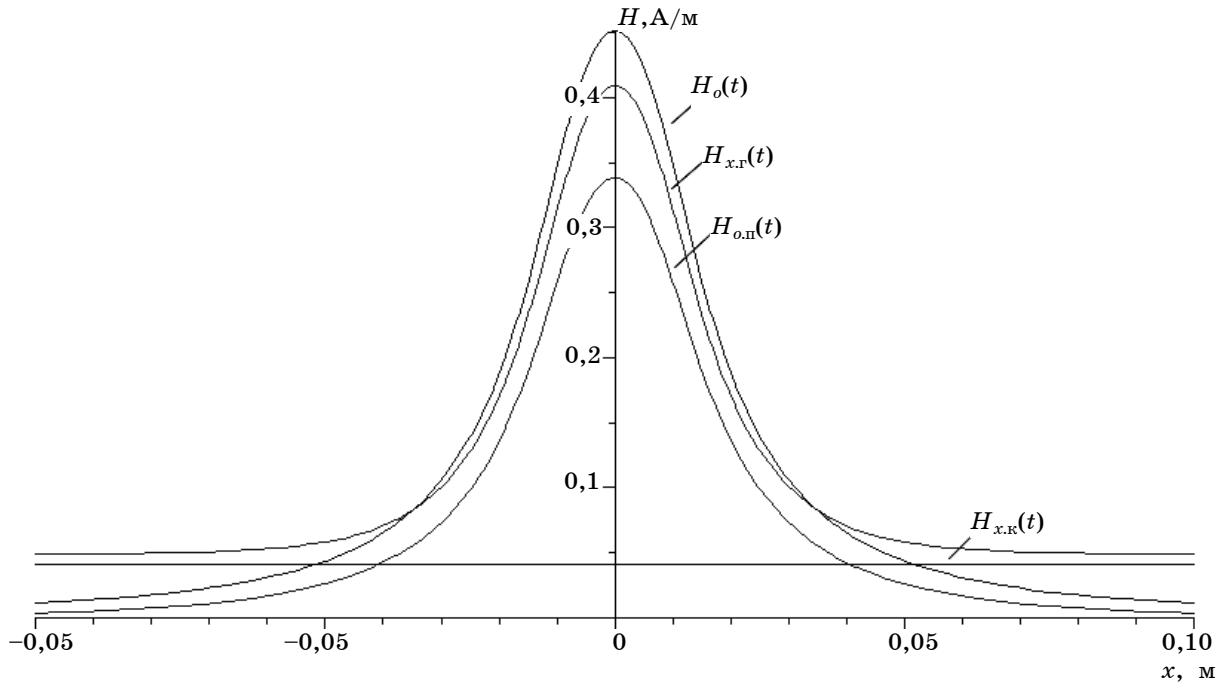


Рис. 4. Модель геликоидального поля $H_{x,r}(t)$ в условиях влияющих факторов при значениях: $I_x = 0,025$ А, $f = 0,05 \cdot 10^6$ Гц, $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м, $L = 1,2$ м

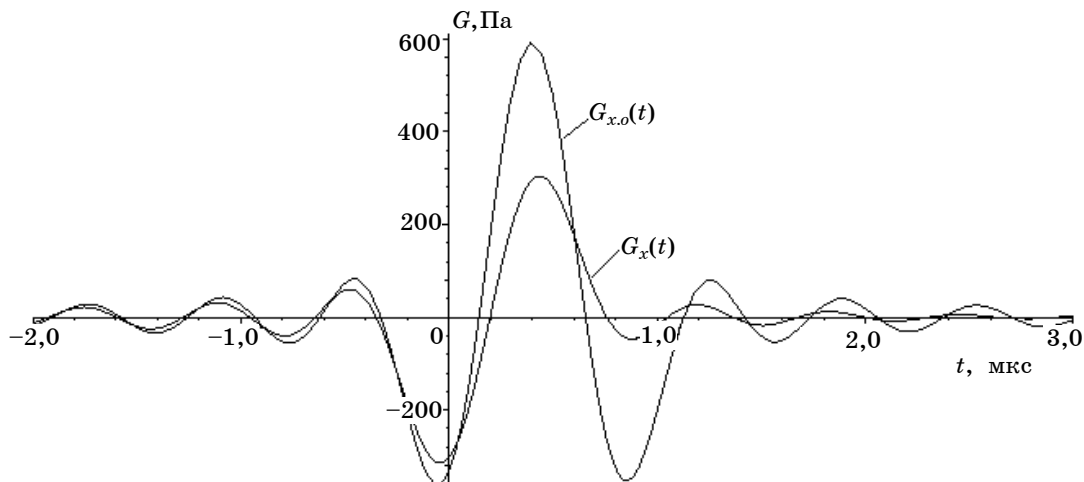


Рис. 5. Модели УЗВ кручения неоптимальной $\sigma_x(t)$ и оптимальной $\sigma_{x,o}(t)$ форм при значениях: $\tau_\Pi = 0,4 \cdot 10^{-6}$ с, $l_M = 2,0 \cdot 10^{-2}$ м, $A_M = 1,0 \cdot 10^{-2}$ м, $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м

Распространяясь в среде звукопровода МПМВ, такие волны не испытывают дисперсию скорости, но имеют частотные искажения вследствие неоднозначного поглощения β_0 волновой энергии по акустическому тракту. Поглощение энергии УЗВ кручения вызывает процессы затухания. Поэтому такая волна (6), достигая выходной сигнальной преобразо-

ватель МПМВ на расстоянии l_x , изменяет свою первоначальную амплитуду по известному закону (рис. 6)

$$\sigma_{xx}(t) = \sigma_x(t) \cdot e^{-\beta_0 \cdot l_x}. \quad (7)$$

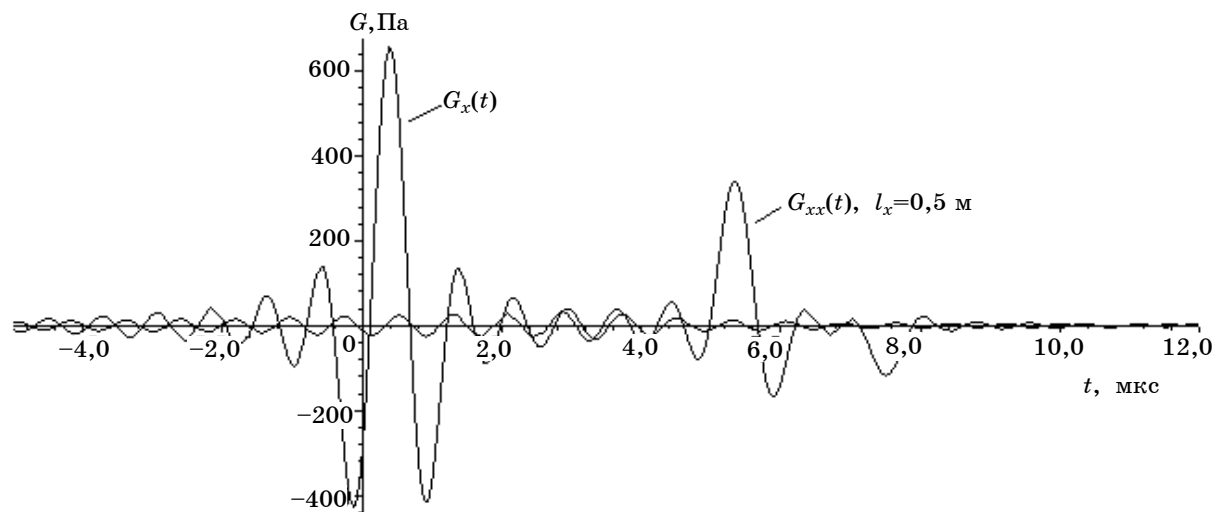


Рис. 6. Модели опорной $\sigma_x(t)$ и производной $\sigma_{xx}(t)$ падающих УЗВ волн кручения

В зоне магнитоупругого преобразования, образованной сигнальным выходным преобразователем чаще всего индуктивного типа [1, 2], упругая УЗВ кручения (7) изменяет магнитную проницаемость: $\mu_{об\ кр} = \mu - \mu_\sigma$, материала звукопровода на величину волновой деформации μ_σ . По такому же закону изменяется величина магнитострикции насыщения $\lambda = \lambda_s$ в зоне магнитоупругого преобразования МПМВ.

Прохождение падающей УЗВ кручения $\sigma_{xx}(t)$ через зону магнитоупругого преобразования со скоростью v_b изменяет ее магнитную индукцию по закону:

$$B_{об}(t) = \mu_o \cdot \mu_{об\ кр} \cdot \left[H_{o\ об} \cdot K_{кэ\ об} - H_c(t) \cdot \left(1 + \frac{A_{ср}}{\pi \sqrt{A_{ср}^2 + (l_{об} / \cos \alpha)^2}} \right) \right], \quad (8)$$

здесь $H_{o\ об}$ – напряженность магнитного поля в зоне подмагничивания; $K_{кэ\ об}$ – коэффициент краевого эффекта в зоне магнитоупругого преобразования; $H_c(t)$ – коэрцитивная сила материала звукопровода; $A_{ср}$ – расстояние от поверхности звукопровода до среднего слоя обмотки индуктивного выходного преобразователя МПМВ длиной $l_{об}$; $\cos \alpha$ – угловая величина волновой сдвиговой деформации.

В пространстве выходного сигнального преобразователя в результате изменения магнитной индукции (8) звукопровода формируется импульсный магнитный поток:

$$\Phi_{об}(t) = B_{об}(t) \cdot S_{об}. \quad (9)$$

Его взаимодействие с обмоткой выходного сигнального преобразователя МПМВ, содержащей эффективное число витков $W_{об\ эф}$ обмоточного провода соответствующего диаметра, при скорости движения v_b наводит на ее выводах ЭДС индукции:

$$e_x(t) = -W_{об\ эф} \cdot \frac{d\Phi_{об}(t)}{dt}, \quad (10)$$

которая усиливается далее в K_y раз усилителем считывания до уровня: $U_x(t) = K_y \cdot e_x(t)$, уверенного его преобразования в прямоугольный видеоимпульс соответствующей полярности (рис. 7).

При использовании подмагничивания в зоне магнитоупругого преобразования для получения оптимального электрического сигнала считывания необходимо учитывать влияние краевого эффекта $K_{кэ\ об}$ элемента подмагничивания.

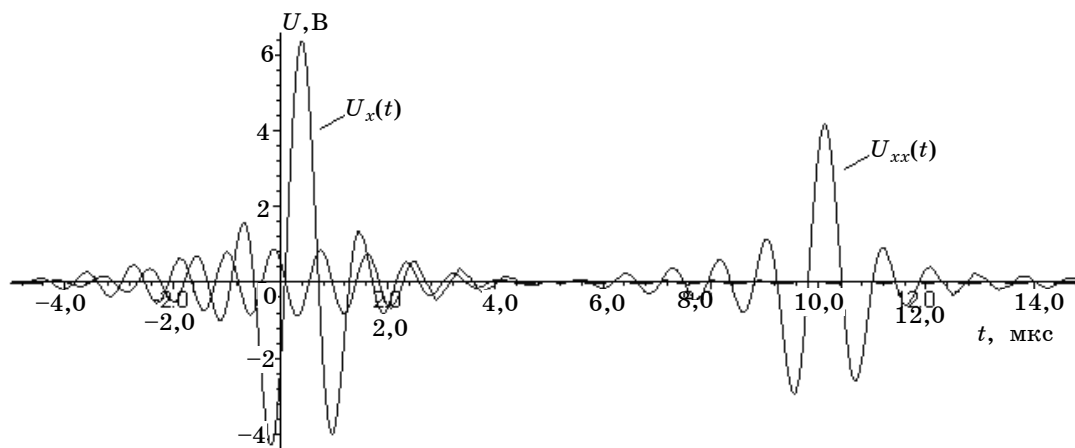


Рис. 7. Модели опорного $U_x(t)$ и выходного $U_{xx}(t)$ сигналов считывания МПМВ при $K_y = 250$ и $l_x = 0,4$ м

Заключение

Созданные математические модели основных факторов влияния магнитострикционных преобразователей перемещений (МПМВ), таких, как краевой и поверхностный эффекты, магнитная вязкость материала звукопровода, дают возможность численно устанавливать границы их работоспособности и проводить оптимизацию конструктивных элементов на этапе проектирования с достижением требуемых метрологических и эксплуатационных характеристик.

Литература

1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия/ под ред. И.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
2. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
3. Демин С.Б. Магнитострикционные системы для автоматизации технологического оборудования. – Пенза: Инф.-изд. центр ПГУ, 2002. – 182 с.
4. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. – М.; Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1957. – 256 с.

Пчелинцева Ольга Николаевна

Аспирант ГОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия»

Дёмин Евгений Станиславович

Лаборант каф. электроники и электротехники

ГОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия»

Дёмин Станислав Борисович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электроники и электротехники

ГОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия»

Эл. почта: dstabor@yandex.ru

Тел.: (8-412) 49-62-97

Pchelintseva O.N., Demin E.S., Demin S.B.

Mathematical modelling of influence factors of mechanical quantity magnetostrictive converters

There has been carried out the modelling of influences of edge and surface effects, magnetic viscosity of material on the parameters of output signals of magnetostrictive converters of movings, and their limiting numerical characteristics are received.

Keywords: mathematical modelling, influence factors, magnetostrictive converters on torsion waves.