

Ю. А. ФЕДОТОВА, Р. Ю. МУКАЕВ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИЛЫ НАТЯЖЕНИЯ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассмотрено влияние силы натяжения, величины провиса и радиуса кривизны звукопровода на дисперсию ультразвуковых волн в магнитоострикционном преобразователе линейных перемещений. Сделан вывод о влиянии радиуса звукопровода в форме окружности на изменение скорости звука датчика угла поворота. *Магнитоострикция; датчик перемещений; изменение скорости ультразвуковых волн; величина провиса звукопровода; датчик угла поворота; сила натяжения звукопровода*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся работы по разработке преобразователей параметров движения, в которых используются новые физические явления и эффекты. Магнитоострикционные преобразователи перемещений (МПП) являются сравнительно новым классом устройств, выпускаемых промышленностью. Эти преобразователи при соответствующем выборе материалов позволяют измерять перемещения объектов в диапазоне температур от минус 150°С до + 300°С. Диапазон измеряемых перемещений может достигать 10 м при нелинейности статической характеристики не более 0,1%.

Базовая конструкция МПП содержит: звукопровод, обмотку возбуждения и приёма акустических сигналов, постоянные магниты, обеспечивающие оптимальное подмагничивание звукопровода для получения максимального коэффициента преобразования. Обмотка приёма акустических сигналов соединена с подвижным контролируемым объектом и перемещается по звукопроводу.

Магнитоострикционные преобразователи могут использоваться для измерения перемещения, скорости и ускорения.

Звукопровод МПП представляет собой ленту или струну, изготовленную из магнитоострикционного материала. В МПП оба конца звукопровода могут быть жестко закреплены и соединяются с демпферами, или один из концов звукопровода может быть жестко закреплен, а второй оставлен свободным. Подобные конструкции используются для измерителей уровня жидких сред.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При закреплении в крайних точках звукопровод натягивают с некоторой начальной силой натяжения H_0 , которая определяется из условий эксплуатации и диапазоном измерений. При таком закреплении звукопровод провисает под действием собственной силы тяжести. Радиус провиса звукопровода оказывает влияние на скорость ультразвуковой волны, которая определяет погрешность измерения перемещения подвижного объекта. Данную зависимость можно использовать также для датчиков угла поворота со звукопроводом в форме окружности.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Величину провиса звукопровода f рассчитывают методом гибких нитей [1, 2], так как в звукопроводе отсутствует изгибная жесткость, и усилие, растяги-

вающее звукопровод, всегда направлено по касательной к звукопроводу.

Пусть опоры крайних точек звукопровода расположены на одном уровне. Тогда допустимо учитывать собственный вес звукопровода с помощью введения равномерно распределённой нагрузки q интенсивностью:

$$q = \gamma S, \quad (1)$$

где γ – удельный вес материала звукопровода, S – площадь поперечного сечения звукопровода.

Наибольший провис получается в середине звукопровода и равен:

$$f_{\max} = \frac{ql^2}{8H} \quad (2)$$

Для определения провиса звукопровода в произвольных точках используют формулу [1]:

$$f_x = \frac{q}{2H} (lx - x^2). \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) видно, что величина провиса f зависит от силы натяжения звукопровода H и от расстояния между крайними точками опоры звукопровода l .

Силу натяжения звукопровода H можно определить исходя из следующего.

Длина звукопровода L определяется максимальным диапазоном перемещений и силой натяжения [2]:

$$L = l + \frac{1}{24} \frac{q^2 l^3}{H_0^2} + \frac{H_0 l}{ES}, \quad (4)$$

где l – расстояние между крайними точками опоры звукопровода, E – модуль Юнга, H_0 – сила натяжения звукопровода при монтаже.

В рабочих условиях происходит отклонение температуры окружающей среды на ΔT от начального значения T_0 . При этом происходит изменение длины звукопровода и изменяется величина силы натяжения звукопровода. Тогда выражение (4) примет вид:

$$L = l + \frac{1}{24} \frac{q^2 l^3}{H_1^2} + \frac{H_1 l}{ES} + \alpha l \Delta T, \quad (5)$$

где H_1 – сила натяжения звукопровода при изменении температуры окружающей среды на ΔT , α – коэффициент линейного расширения.

Силу натяжения звукопровода H_1 в рабочих условиях определяют по выражению:

$$H_1^3 + H_1^2 \left(\frac{q^2 l^2 ES}{24 H_0^2} - H_0 + \alpha ES \Delta T \right) - \frac{q^2 l^2 ES}{24} = 0. \quad (6)$$

Из выражений (2), (3) и (6) видно, что на величину провиса наибольшее влияние оказывает изменение температуры окружающей среды и длина звукопровода.

Под действием собственной силы тяжести в магнитострикционном звукопроводе происходит провис, который влияет на возникновение затухания ультразвуковых волн. При этом величина затухания ультразвуковых волн ограничивает радиус провиса ленты [3].

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{1 + \sigma}{R^2} \theta \right) \quad (7)$$

где x – расстояние вдоль оси звукопровода, θ – угловое смещение, R – радиус кривизны, $\sqrt{\mu/\rho}$ – скорость поперечной волны, σ – коэффициент Пуассона.

Максимальный радиус кривизны зависит от длины звукопровода и от величины ее провиса в середине:

$$R_{\max} = \frac{f_{\max}}{2} + \frac{l^2}{8f_{\max}}, \quad (8)$$

или с учетом выражения (3) получаем

$$R_{\max} = \frac{ql^2}{16H_1} + \frac{H_1}{q}. \quad (9)$$

Радиус кривизны звукопровода в произвольной точке определяется с помощью выражения:

$$R_x = \sqrt{\left(\frac{H_1}{q} + \frac{q}{2H_1} \left(lx - x^2 - \frac{l^2}{8} \right) \right)^2 - \left(\frac{l}{2} - x \right)^2}. \quad (10)$$

Решение уравнения для распространяющихся волн дает соотношение для групповой скорости [3]:

$$U = V \sqrt{1 - \frac{V_s^2(1 + \sigma)}{\omega^2 R^2}} = V \sqrt{1 - G}, \quad (11)$$

где U – групповая скорость, V – скорость распространения, V_s – фазовая скорость, ω – частота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Наибольшее влияние радиуса кривизны звукопровода на изменение относительной скорости распространения ультразвуковых волн следует учитывать при проектировании датчиков угла поворота, у которых звукопровод имеет форму окружности. Функциональная зависимость относительной скорости распространяющихся волн от радиуса кривизны звукопровода, построенная по выражению (11), имеет сложную форму.

Радиус кривизны звукопровода в форме окружности нецелесообразно делать менее 0,3 м, так как при таком значении радиуса относительная скорость ультразвуковых волн значительно увеличивается и составляет более 1%. При изменении радиуса кривизны звукопровода от 0,3 м до 0,5 м скорость ультразвуковых волн составляет менее 0,04%. При дальнейшем увеличении радиуса кривизны звукопровода (рис. 1) изменение скорости ультразвуковых волн составляет до 0,02%.

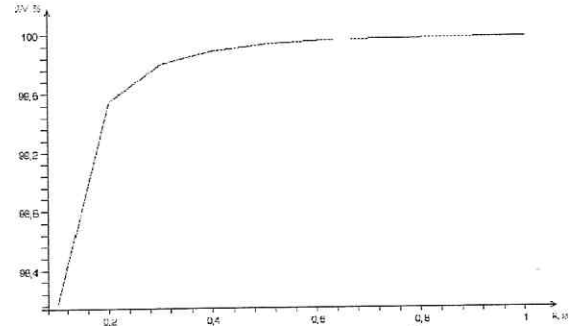


Рис. 1. Зависимость относительной скорости распространяющихся волн от радиуса кривизны звукопровода датчика угла поворота

При начальной силе натяжения 40 Н изменение радиуса кривизны звукопровода в разных точках с учетом выражения (10) для звукопровода длиной 10 м составляет 0,005%, для звукопровода длиной 5 м – 0,0003%, а для звукопровода длиной 2 м – 0,00001% при изменении температуры окружающей среды на 5°C.

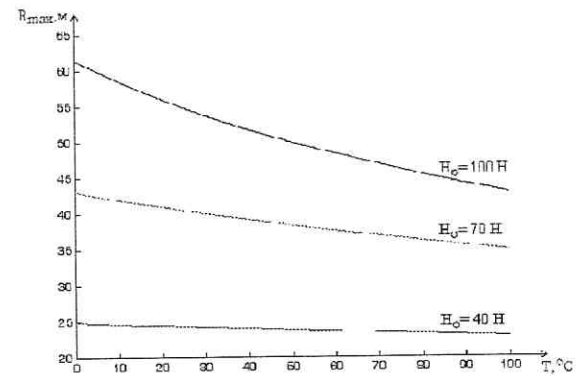


Рис. 2. Зависимость радиуса кривизны в середине звукопровода от температуры

Учитывая выражения (6) и (9), на величину радиуса кривизны в середине звукопровода, закрепленного в крайних точках, наибольшее влияние оказывает изменение температуры окружающей среды и длина звукопровода. Величина радиуса кривизны в середине звукопровода составляет 24,5 м при начальной силе натяжения 40 Н и 43 м – при 70 Н и при изменении температуры окружающей среды на 5°C (рис. 2). При изменении температуры окружающей среды на 10°C радиус увеличивается на 2 м для звукопровода длиной 10 м и начальной силы натяжения 70 Н. При этом изменение скорости звука не превышает 0,001%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер, И. А. Прочность, устойчивость, колебания: справочник в трех томах / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. Т. 1. 812 с.
2. Писаренко, Г. С. Сопротивление материалов: учебник для вузов / под ред. Г. С. Писаренко. Киев: Вища школа, 1979. 696 с.
3. Мэзон, У. Физическая акустика / под ред. У. Мэзона. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч. А. М.: Мир, 1966. 592 с.