

УДК 534-16:534-8:621.9.048.6

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Степаненко Д.А.¹, Емельянова А.С.², Плескач М.А.³, Солодка Н.В.⁴

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь²ООО «Елена Беляева, Нина Васильева и партнеры», Минск, Республика Беларусь³ОАО «Завод «Электронмаш», Минск, Республика Беларусь⁴ООО «СВ Велор», Минск, Республика Беларусь

В статье рассматриваются методика и результаты оптимизации составных кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний, состоящих из нескольких последовательно соединенных сегментов из материалов с различным волновым сопротивлением. Расчет и проектирование таких концентраторов могут осуществляться путем решения дифференциальных уравнений их колебаний или с помощью метода передаточных матриц [1, 2]. Преимуществами кольцевых концентраторов по сравнению с обычно применяемыми стержневыми являются простота изготовления, малые габаритные размеры и масса.

Задача оптимизации состояла в следующем. Необходимо было для заданной моды колебаний двухсегментного концентратора определить центральный угол $2\varphi_0$ входного сегмента, при котором обеспечивается максимальный коэффициент K усиления колебаний по амплитуде. Задача решалась с использованием метода передаточных матриц. Частота колебаний варьировалась в диапазоне $f = 20..30$ кГц с шагом $\Delta f = 20$ Гц, а угол φ_0 – в диапазоне $\varphi_0 = 0..180^\circ$ с шагом $\Delta\varphi_0 = 0,36^\circ$. Свойства материалов и геометрические параметры сегментов были приняты теми же, что и в предшествующих исследованиях [2]: радиус средней линии $R = 29$ мм; толщина в радиальном направлении $h = 2$ мм; модули упругости материалов сегментов $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па (сталь), $E_2 = 1,3 \cdot 10^{11}$ Па (бронза); плотности материалов сегментов $\rho_1 = 7800$ кг/м³, $\rho_2 = 8300$ кг/м³. Для каждой пары значений частоты и угла рассчитывался определитель

$$\det \begin{pmatrix} T_{12}(\varphi_0, f) & T_{14}(\varphi_0, f) & T_{15}(\varphi_0, f) \\ T_{32}(\varphi_0, f) & T_{34}(\varphi_0, f) & T_{35}(\varphi_0, f) \\ T_{62}(\varphi_0, f) & T_{64}(\varphi_0, f) & T_{65}(\varphi_0, f) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

составленный из элементов передаточной матрицы $T(\varphi_0, f)$. Резонансные кривые на плоскости (φ_0, f) определялись как линии, вдоль которых определитель (1) обращается в нуль. Из множества резонансных кривых, соответствующих множеству мод колебаний концентратора, была выбрана одна, соответствующая моде со знакопостоянной амплитудой радиальных колебательных смещений: как было показано ранее [2], усиление колебаний по амплитуде обеспечивается только при работе концентратора на таких модах. Для выбора необходимой резонансной кривой использовались результаты ранее выполненных расчетов [2], согласно которым одна из мод со знакопостоянной амплитудой

возникает при $\varphi_0 = 45^\circ$ и $f = 22,75$ кГц. Для выбранной моды колебаний рассчитывалась передаточная матрица концентратора на резонансной частоте $f_{рез}$ в зависимости от угла φ_0 :

$$T_{рез}(\varphi_0) = T(\varphi_0, f_{рез}(\varphi_0))$$

Коэффициент усиления рассчитывался по формуле:

$$K(\varphi_0) = \left| W_0(\varphi_0)T_{рез22}(\varphi_0) + N_0(\varphi_0)T_{рез24}(\varphi_0) + M_0(\varphi_0)T_{рез25}(\varphi_0) \right|,$$

где W_0 , N_0 , M_0 – значения амплитуды радиальных колебательных смещений, продольной силы и момента во входном поперечном сечении концентратора $\varphi = 0$, определяемые из уравнения

$$\begin{pmatrix} T_{рез12}(\varphi_0) & T_{рез14}(\varphi_0) & T_{рез15}(\varphi_0) \\ T_{рез32}(\varphi_0) & T_{рез34}(\varphi_0) & T_{рез35}(\varphi_0) \\ T_{рез62}(\varphi_0) & T_{рез64}(\varphi_0) & T_{рез65}(\varphi_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_0 \\ N_0 \\ M_0 \end{pmatrix} = 0$$

Амплитуда W_0 может быть задана произвольным образом, например, $W_0 = 1$, а амплитуды N_0 и M_0 рассчитаны по формулам

$$N_0(\varphi_0) = \frac{-T_{рез32}(\varphi_0) \cdot \frac{T_{рез15}(\varphi_0)}{T_{35}(\varphi_0)} + T_{рез12}(\varphi_0)}{T_{рез34}(\varphi_0) \cdot \frac{T_{рез15}(\varphi_0)}{T_{рез35}(\varphi_0)} - T_{рез14}(\varphi_0)} \times \\ \times W_0(\varphi_0), \\ M_0(\varphi_0) = -\frac{T_{рез12}(\varphi_0)}{T_{рез15}(\varphi_0)} W_0(\varphi_0) - \\ - \frac{T_{рез14}(\varphi_0)}{T_{рез15}(\varphi_0)} N_0(\varphi_0).$$

В результате расчетов была получена кривая зависимости коэффициента усиления от угла φ_0 , представленная на рисунке 1. Как видно, зависимость $K(\varphi_0)$ характеризуется наличием трех максимумов при углах $51,48^\circ$, $93,6^\circ$ и $138,96^\circ$, которым соответствуют коэффициенты усиления 1,57, 2,3 и 1,94.

Точное определение оптимальных значений угла φ_0 затрудняется колебательными артефактами на расчетной кривой $K(\varphi_0)$, причины возникновения которых требуют дополнительных исследований. Резонансные частоты для концентраторов с оптимальными значениями угла φ_0 составляют 22,9 кГц, 24,01 кГц и 25,97 кГц. При углах $\varphi_0 = 0^\circ$ и $\varphi_0 = 180^\circ$, соответствующих выполненным из одного материала концентраторам, коэффициент усиления составляет $K = 1$. На рисунке 2 представлены расчетные собствен-

ные формы колебаний концентраторов с оптимальными значениями угла φ_0 .

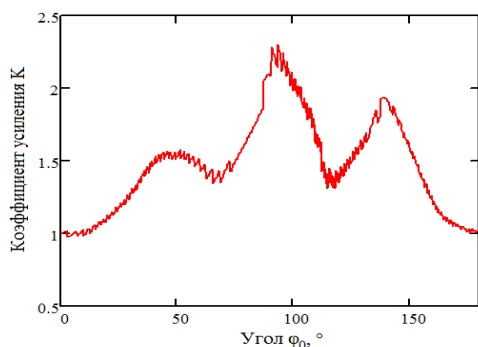
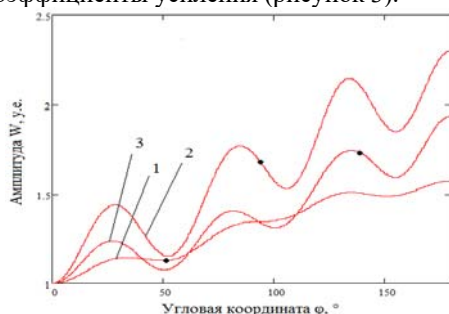
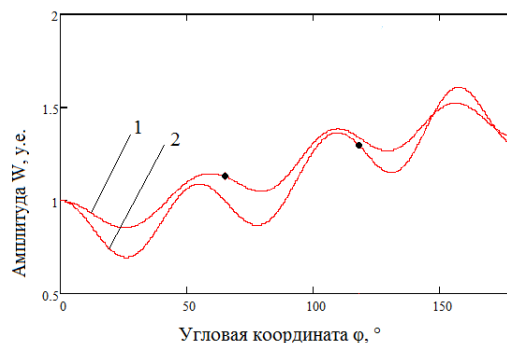


Рисунок 1 – Расчетная зависимость коэффициента усиления от угла φ_0

Как видно, все расчетные собственные формы имеют одинаковое число максимумов амплитуды $n = 7$ (на рисунке показаны только максимумы, находящиеся на половине длины окружности), что соответствует выбору одной моды колебаний при расчете. Границы сегментов обозначены на рисунке 2 точками на кривых. Для кривой 1 на входном сегменте находятся 2 максимума амплитуды и 5 максимумов – на выходном сегменте; для кривой 2: 4 максимума на входном сегменте и 3 максимума – на выходном; для кривой 3: 6 максимумов на входном сегменте и 1 максимум – на выходном. Для собственных форм, для которых на выходном сегменте находится четное число максимумов амплитуды, наблюдаются минимальные коэффициенты усиления (рисунок 3).



1 – $\varphi_0 = 51,48^\circ$, 2 – $\varphi_0 = 93,6^\circ$, 3 – $\varphi_0 = 138,96^\circ$
Рисунок 2 – Расчетные собственные формы колебаний концентраторов с оптимальными значениями угла φ_0



1 – $\varphi_0 = 65,52^\circ$, 2 – $\varphi_0 = 118,08^\circ$
Рисунок 2 – Расчетные собственные формы колебаний концентраторов с минимальными значениями коэффициента усиления

Это объясняется тем, что из соображений геометрической симметрии в выходном сечении концентратора $\varphi = 180^\circ$ должен находиться экстремум амплитуды, который при наличии на выходном сегменте четного числа максимумов может быть только минимумом.

Таким образом, показано, что для заданной моды колебаний двухсегментного концентратора зависимость коэффициента усиления от угла φ_0 имеет множество минимумов и максимумов, соответствующих различному распределению числа максимумов амплитуды между входным и выходным сегментами. Максимальные значения коэффициента усиления при нечетном общем числе n максимумов амплитуды наблюдаются, когда на выходном сегменте находится нечетное число максимумов амплитуды.

Литература

1. Степаненко, Д.А. Теоретическое обоснование возможности усиления ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко [и др.] // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2017, 2. – 13 с.
2. Степаненко, Д.А. Исследование характеристик составных кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко [и др.] // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2018, 2. – 11 с.

УДК 621.822.71

КОЛЬЦЕВОЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ ШАРИКОВ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Щетникович К.А., Судникович К.А., Окопчук Я.В

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Основным достоинством обработки шариков соосным инструментом является качественная приработка шариков к диску. Шарик относительно инструмента перемещаются по концентрическим кольцевым дорожкам тороидальной формы, и возрастающая площадь контакта спо-

собствует повышению точности шлифования или доводки изделий. Рассматриваемый метод чувствителен к погрешностям формы и размеров исходных заготовок. В начальный период обработки давление инструмента на шарики распределяется неравномерно и большие динамические