АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 1

УДК 534.232

СОГЛАСОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С КАВИТИРУЮЩЕЙ ВОДОЙ

В. Н. Монахов, С. Л. Пешковский, А. Д. Яковлев

Предложен метод расчета стержневых акустических трансформаторов для согласования магнитострикционных преобразователей с кавитирующей водой. Показано, что одновременная реализация наилучших согласующих и усиливающих свойств возможна при использовании гантельного трансформатора, состоящего из определенным образом подобранных сужающегося и расширяющегося резонансных звеньев.

Удельная механическая мощность, которую резонансный магнитострикционный преобразователь способен передать в акустическую нагрузку, ограничивается двумя характеристиками, обусловленными свойствами магнитострикционного материала: магнитострикционным напряжением насыщения $\tau'=\varepsilon' E\psi_1$ и предельной колебательной скоростью $V'=\sigma'\psi_2/\rho C$, связанной с наличием усталостной прочности. Тот или иной фактор является решающим в зависимости от сопротивления акустической нагрузки [1], причем наибольшая удельная мощность, излучаемая при идеальном согласовании с нагрузкой, равна $W'=0{,}5\tau' V'$ [2]. Здесь ε' — амплитуда магнитострикционной деформации насыщения; E — модуль Юнга; ψ_1 и φ_2 — коэффициенты, учитывающие особенности конструкции преобразователя; σ' — амплитуда напряжения усталостной прочности; ρ и C — плотность и скорость звука в материале преобразователя. В качестве связующего звена между преобразователем и акустической нагрузкой широко используют резонансные стержни, площадь поперечного сечения которых изменяется по определенному закону [3, 4]. Они служат для трансформации амплитуды колебаний и сопротивления нагрузки. Входное сечение такого трансформатора жестко соединяется с механическим выходом преобразователя, выходное взаимодействует с акустической нагрузкой.

Рассмотрим, как из всего многообразия известных видов и форм стержневых трансформаторов выбрать такой, который позволяет передать в конкретную акустическую нагрузку наибольшую мощность преобразователя, т. е. согласует преобразователь с акустической нагрузкой.

Предположим, что такое согласование уже осуществлено. Тогда, пренебрегая потерями, можно записать

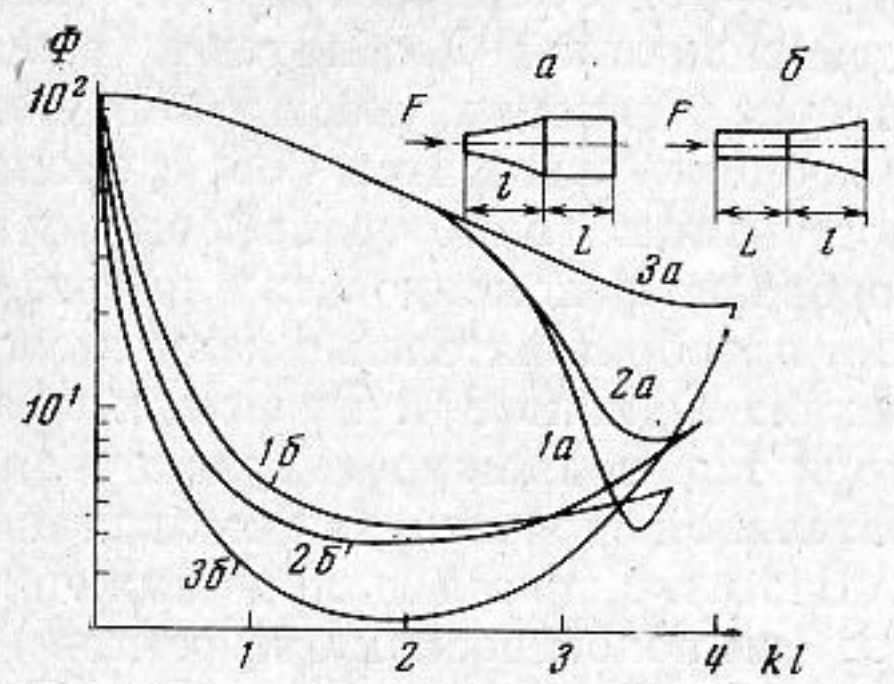
$$\tau'/V'=r_{\text{н}}K^2N^2 \tag{1}$$

или

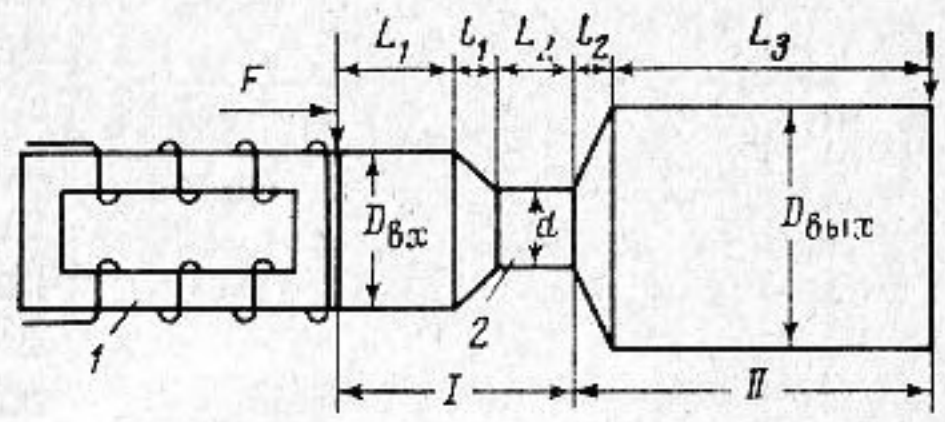
$$\tau'/r_{\text{н}}V=KN^2. \tag{2}$$

Здесь $r_{\text{н}}$ — активная составляющая удельного акустического сопротивления нагрузки; $K=V/V'$ — коэффициент усиления (ослабления) трансформатора по амплитуде; V — колебательная скорость на взаимодействующем с акустической нагрузкой конце трансформатора; $N^2=S_2/S_1$; S_1 и S_2 — площади поперечных сечений входного и выходного концов трансформатора. Вы-

ражение для коэффициента бегущей волны $k_б = r_т/\rho C$, где $r_т = r_н K^2 N^2$ – активная составляющая удельного входного сопротивления трансформатора (трансформированная к сечению S, активная составляющая удельного сопротивления нагрузки), с учетом (1) представим в виде $k_б' = \varepsilon' E \psi_1 / \sigma' \psi_2$. Подставив сюда данные, например, из [2, 5], можно заметить, что для всех магнитострикционных материалов $k_б' \ll 1$, т. е. даже при согласовании преобразователя сохраняется режим, близкий к режиму стоячей волны. Отсюда следует, что расчет резонансных размеров рассматриваемой системы может осуществляться известными методами [2–4] с учетом только ре-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость фактора Ф для стержневых трансформаторов различной формы от волновой длины участка переменного сечения kl при расположении этого участка на входном *а* и на выходном *б* конце и при различной его форме: *1* – катеноидальной, *2* – экспоненциальной, *3* – конической, *F* – возбуждающая сила

Фиг. 2. Магнитострикционный преобразователь *1* с гантельным согласующим трансформатором *2*; l_1 и l_2 – переходные звенья резонансных участков I и II гантельного трансформатора

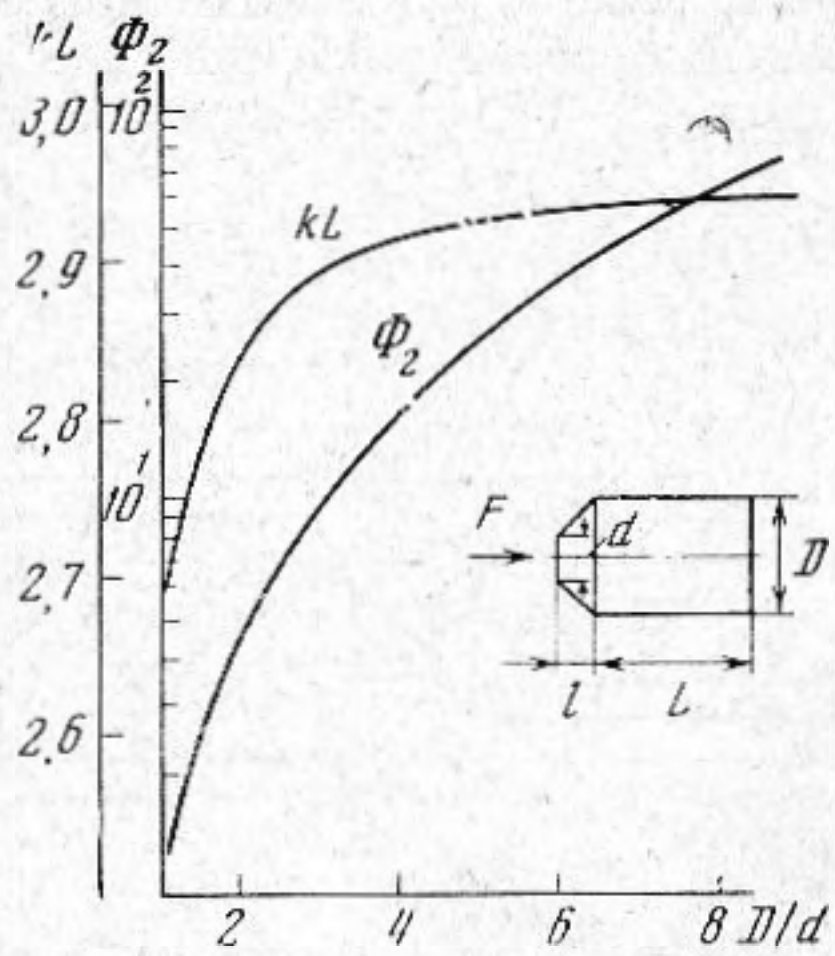
активной составляющей сопротивления нагрузки. Рассмотрим теперь вопрос о согласовании преобразователя по активной составляющей акустического сопротивления нагрузки. Обозначим $\Phi' = \tau'/r_н V$ – коэффициент, характеризующий необходимую степень согласования преобразователя (фактор согласования преобразователя), и $\Phi = KN^2$ – коэффициент, характеризующий согласующие возможности трансформатора (фактор согласования трансформатора). Фактор Ф определяется формой трансформатора. Из (2) видно, что согласование преобразователя с акустической нагрузкой с точки зрения получения максимальной удельной мощности осуществляется при условии $\Phi = \Phi'$. Это условие определяет необходимую форму резонансного трансформатора и его геометрические параметры.

При расчете величины Φ' для серийного преобразователя, когда точные значения предельных характеристик материала, а также коэффициентов φ_1 и φ_2 неизвестны, можно принять, что $W' = \eta W_э / S_1$, где η – к.п.д. преобразователя, $W_э$ – его номинальная электрическая мощность, а V' совпадает с номинальным значением амплитуды колебательной скорости. Тогда $\Phi' = 2\eta W_э / S_1 r_н V V'$.

Рассмотрим в качестве примера согласование преобразователя с весьма распространенной акустической нагрузкой – кавитирующей водой и найдем для этого случая оптимальную форму и параметры резонансного трансформатора. Известно [2, 6], что при излучении ультразвука в кавитирующую воду сохраняется примерно постоянное соотношение $r_н V = \sqrt{2} P_0$, где P_0 – гидростатическое давление. Отсюда следует выражение $\Phi' = \varepsilon' E \psi_1 / \sqrt{2} P_0$, из которого видно, что Φ' зависит только от характеристик самого преобразователя и от гидростатического давления. Значения Φ' при $P_0 = 10^5$ *н/м*^{2} и $\psi_1 = 0{,}45$, выполненные по величинам ε' и E для основных магнитострикционных материалов: альфер – 17,4; пермендюр –

44,5; феррит — 15,6; никель — 22,8. Значения Φ' для некоторых серийных магнитострикционных преобразователей [7], рассчитанные с помощью выражения $\Phi'=\sqrt{2}\eta W_э/S_1P_0V'$ при $\eta=0{,}5$ и $P_0=10^5$ *н/м*², следующие: ПМС — 15А18 — 3,0; ПМС — 27—3,7; ПМС — 39—3,4.

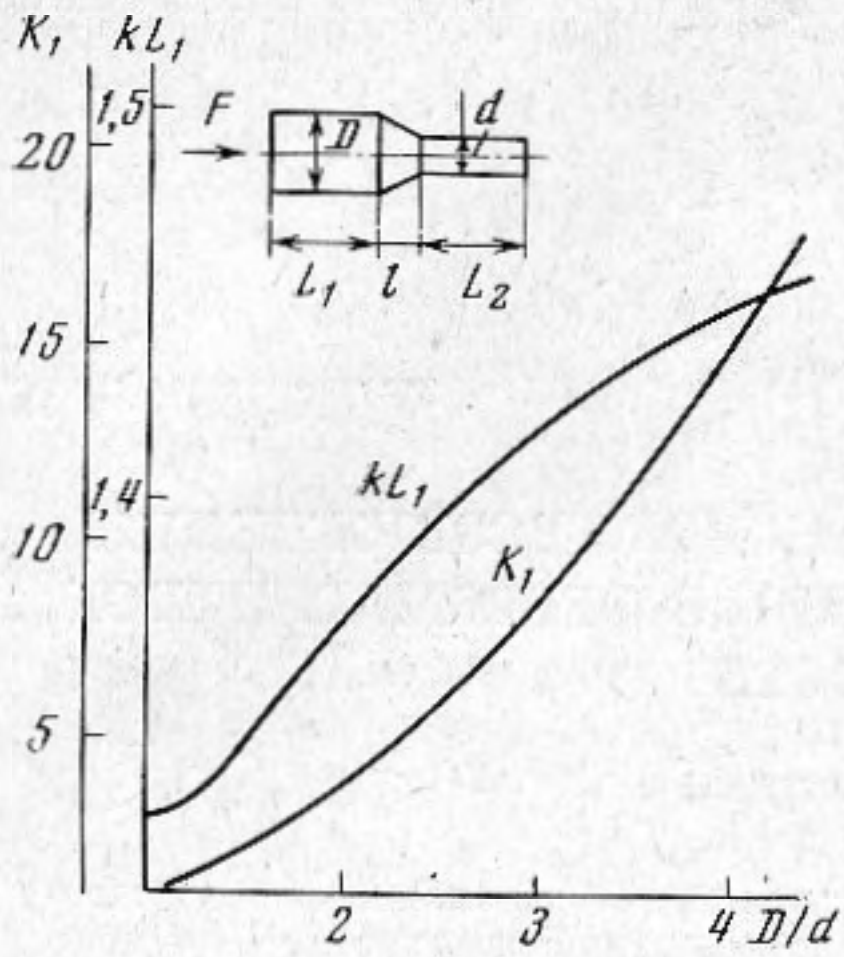
Пусть согласующее устройство представляет собой расширяющийся в сторону акустической нагрузки резонансный стержень, подобный описанным в [3, 4] (см. фиг. 1, *а*, *б*). На фиг. 1 приведены изменения факторов Ф для таких трансформаторов различной формы при $N=10$. Оказывается, что наибольшей величиной Ф обладают трансформаторы, у которых участок переменного сечения находится со стороны входного конца. Такие трансформаторы целесообразно рекомендовать для согласования преобразователей с кавитирующей водой. Однако при их использовании теряется возможность увеличения колебательной скорости, так как для них $K\leqslant1$. В то же время для достижения многих технологических эффектов в жидкости требуется заранее заданная колебательная скорость V (или интенсивность акустического излучения I), которая обычно больше V'.



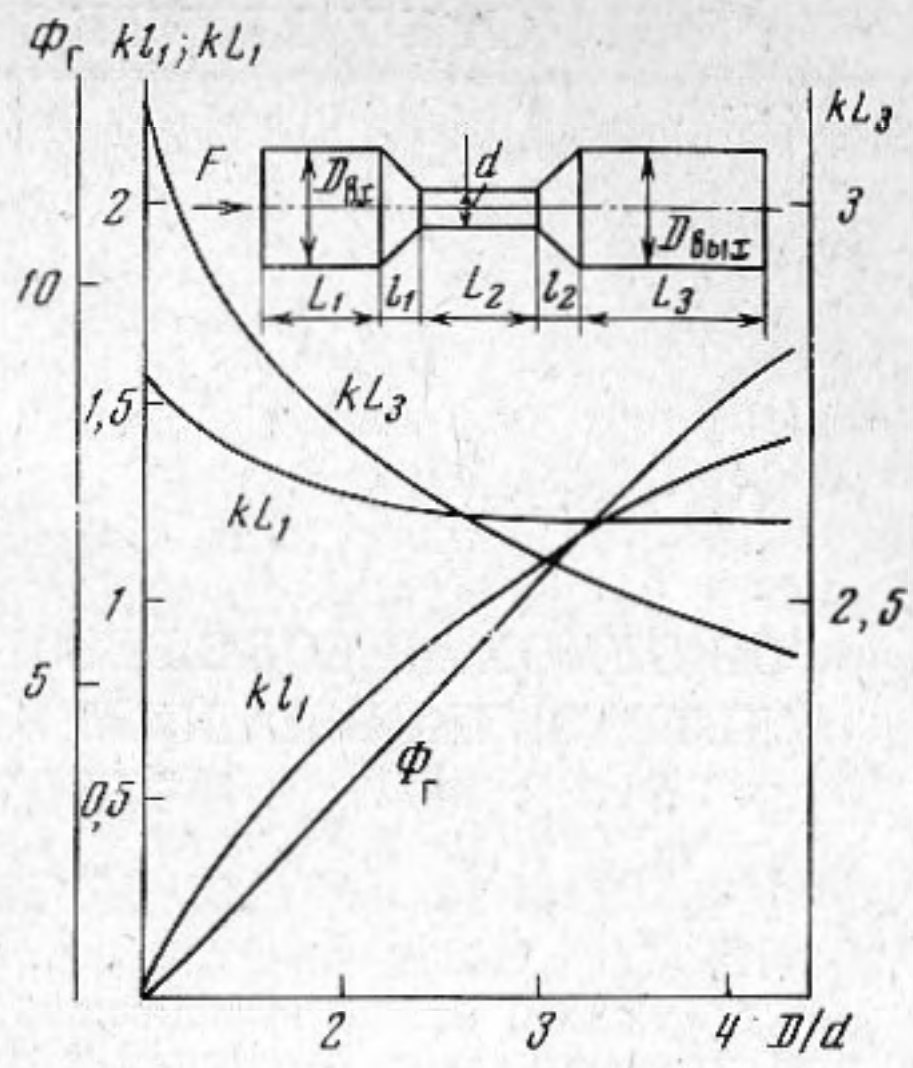
Фиг. 3. Зависимость фактора Φ_2 и волновой длины звена постоянного сечения kL от отношения выходного и входного диаметров расширяющегося трансформатора с коническим переходным звеном; $kl=0{,}5$

Пусть согласующее устройство представляет собой трансформатор, состоящий из двух резонансных участков — сужающегося участка I и расширяющегося участка II (фиг. 2). Очевидно, общий коэффициент усиления такого гантельного трансформатора равен $K_г=K_1K_2$ (K_1 и K_2 — соответственно коэффициенты усиления резонансных участков I и II), а его общий фактор согласования $\Phi_г=\Phi_1\Phi_2=K_гN^2$ (Φ_1 и Φ_2 — соответственно факторы согласования резонансных участков I и II). Если теперь выбрать форму гантельного трансформатора таким образом, чтобы на первом участке $\Phi_1=1$, $K_1>1$, а на втором участке $K_2=1$, $\Phi_2>1$, то получим $\Phi_г=\Phi_2$ и $K_г=K_1$. Другими словами, резонансные участки гантельного трансформатора будут независимо друг от друга выполнять усилительные (участок I) и согласующие (участок II) функции. Из всего комплекса известных [3, 4] видов и форм трансформаторов этим требованиям удовлетворяют следующие: для участка I — сужающиеся ступенчатые трансформаторы с переходным звеном переменного сечения; для участка II — расширяющиеся трансформаторы, подобные изображенному на фиг. 1. При этом длина переходных звеньев этих трансформаторов (фиг. 2) должна отвечать условию $kl_1=kl_2\to0$, где k — волновое число; для практических целей достаточно, чтобы $kl_1=kl_2=0{,}5$. На фиг. 3 представлены расчетные параметры расширяющегося трансформатора с коническим переходным звеном при $kl=0{,}5$; на фиг. 4 сужающегося ступенчатого трансформатора с коническим переходным звеном при $kl=0{,}5$ (заметим, что конические переходные звенья наиболее просты в изготовлении). Расчет второго трансформатора производится по заданным значениям V или I, а первого — исходя из условия $\Phi_2=\Phi'$. Гантельный трансформатор получается простой стыковкой узких (или широких) концов подобных трансформаторов: так, в гантельном трансформаторе, изображенном на фиг. 2, трансформатор фиг. 3 служит участком II, а трансформатор фиг. 4 — участком I.

Пусть теперь согласующее устройство представляет собой изображенный на фиг. 2 гантельный трансформатор, у которого $D_{вх}=D_{вых}$, т. е. $N=1$. Тогда для него $\Phi_г=K_г=V/V'$. Используя общее выражение $I=0{,}5\ r_нV^2$,



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Зависимость коэффициента усиления K_1 и волновой длины входного звена kL_1 ступенчатого трансформатора с коническим переходным звеном от отношения его входного и выходного диаметров; $L_1=L_2$, $kl=0{,}5$

Фиг. 5. Зависимость фактора $\Phi_г$, волновых длин входного kL_1, выходного kL_3 и конического переходного kl_1 звеньев гантельного трансформатора от отношения диаметров его широкой и узкой части; $L_1=L_2$, $l_1=l_2$, $D_{вх}=D_{вых}$

можно показать, что в этом случае при согласовании интенсивность излучения в акустическую нагрузку равна $I=W'$ и согласование осуществляется без изменения излучающей площади преобразователя. Параметры гантельного трансформатора при $N=1$, $L_1=L_2$ и $l_1=l_2$ приведены на фиг. 5.

Авторы выражают благодарность И. П. Голяминой за участие в обсуждении работы и ее критику.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Голямина И. П.* Магнитострикционные излучатели из ферритов. В кн. Источники мощного ультразвука под ред. Л. Д. Розенберга, М., «Наука», 1967, 111–148.
2. *Кикучи Е.* Ультразвуковые преобразователи, М., «Мир», 1972.
3. *Меркулов Л. Г.* Теория ультразвуковых концентраторов. Акуст. ж., 1957, *3*, 3, 230–238.
4. *Меркулов Л. Г., Харитонов А. В.* Теория и расчет составных концентраторов. Акуст. ж., 1959, *5*, 2, 183–190.
5. *Neppiras E. A.* Some remarks on the maximum power – handling capacity of resonant electromechanical transducers. Acustica, 1968, *19*, 1, 54–63.
6. *Монахов В. Н., Пешковский С. Л., Попович А. С., Чиняков И. П., Фомичев Б. И., Яковлев А. Д.* К вопросу о втором пороге ультразвуковой кавитации в воде. Акуст. ж., 1975, *21*, 3, 432–435.
7. *Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И., Хавский Н. Н.* Ультразвуковая технология, М., «Металлургия», 1974.

Московский институт
химического машиностроения

Поступила
21 июля 1976 г.
После исправления
27 июля 1977 г.