АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVII 1971 Вып. 4

УДК 534.232:534.29

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ СТЕКЛА

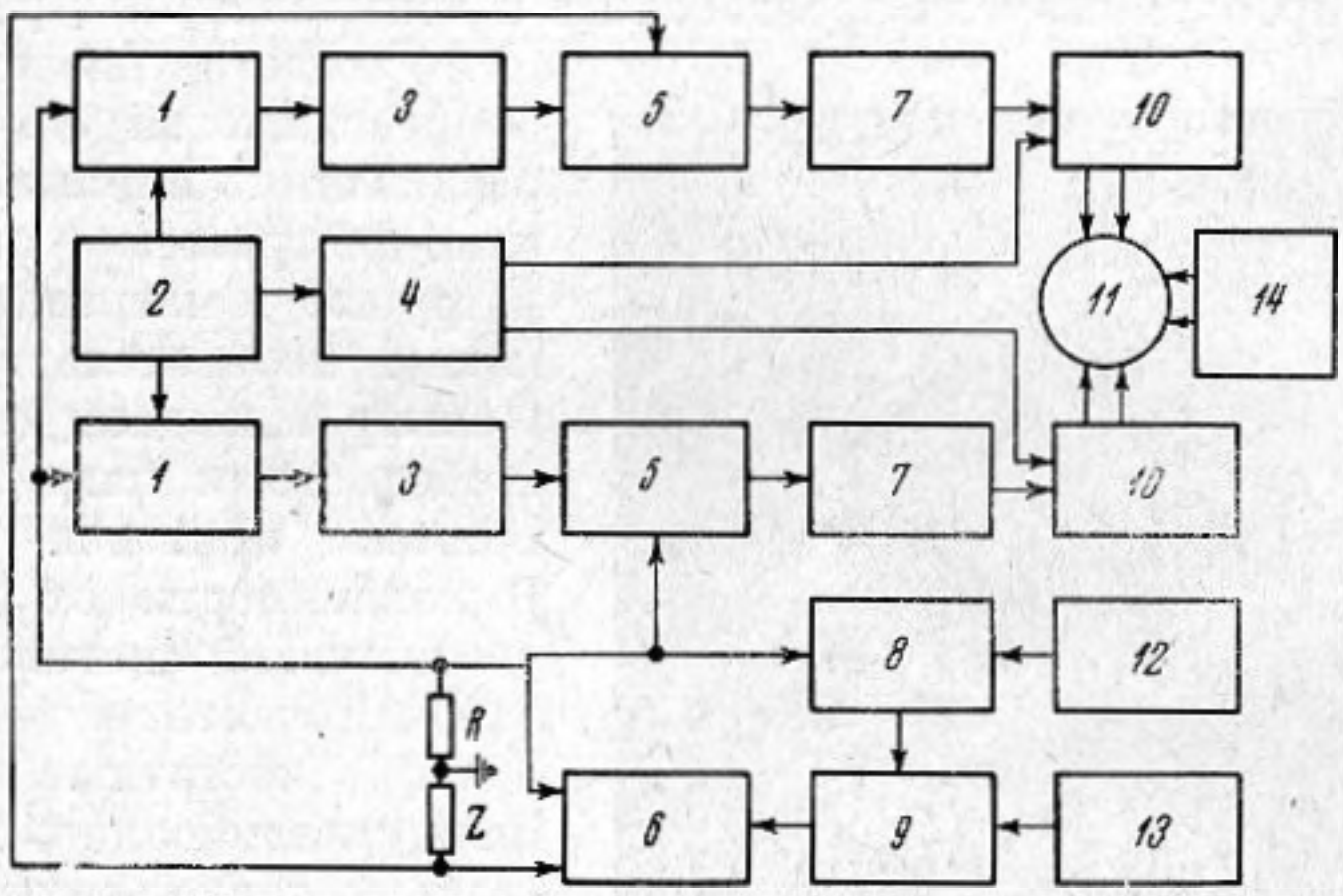
С. А. Бойдек, И. П. Голямина, В. С. Марголин

С помощью установки, позволяющей получать импеданц-диаграммы преобразователей в рабочих режимах, определены параметры эквивалентной схемы колебательной системы ультразвукового станка в процессе резания стекла и оценены его к.п.д. и сопротивление акустической нагрузки.

Сведения о величине сопротивления акустической нагрузки при ультразвуковых технологических процессах необходимы для правильного выбора и расчета преобразователя и ультразвуковой колебательной системы [1], для согласования преобразователя с источником возбуждения, а также для выяснения некоторых закономерностей самого процесса и, в первую очередь, его энергетического баланса. Однако в литературе по ультразвуковой технологии сведения об акустических нагрузках весьма скудны. Так, по вопросу о нагрузках при ультразвуковом резании известны всего две публикации: работа [2] — об измерении нагрузки при резании твердых сплавов на мощном станке и работа [3], в которой сделана попытка определить сопротивление нагрузки расчетным путем по величине действующей силы. Наиболее удобным методом определения величины нагрузки представляется оценка ее по изменению частотной характеристики комплексного входного электрического сопротивления преобразователя Z, т. е. метод измерения импеданц-диаграмм преобразователя в свободном и нагруженном состоянии. Однако такие измерения в рабочих режимах до сих пор были весьма затруднительны ввиду быстрого изменения величины и характера технологической нагрузки со временем, а также изменения свойств самого преобразователя в результате его нагревания в процессе работы.

С целью существенного ускорения процесса измерений, приближения их условий к условиям, соответствующим эксплуатационным режимам и обеспечения оперативного получения информации в Акустическом институте АН СССР был разработан специальный метод [4], который позволяет осуществлять измерения частотной характеристики Z в процессе проведения технологической операции с реальной нагрузкой. Метод основан на раздельном измерении модуля и фазы входного импеданца с последующим формированием сигналов, необходимых для регистрации годографа Z. Применение этого метода позволило исключить влияние частотно-фазовой характеристики источника возбуждения на точность измерений, благодаря чему возникла возможность использования достаточно мощных усилителей без предъявления к характеристикам последних каких-либо дополнительных требований. Измерения импеданц-диаграмм проводятся в режиме непрерывного изменения рабочей частоты с индикацией импеданц-диаграмм на экране электронно-лучевой трубки. Увеличение точности измерений достигается при этом с помощью специально разработанного способа частотной калибровки регистрируемой кривой путем нанесения на нее меток, расположенных через равные частотные интервалы,

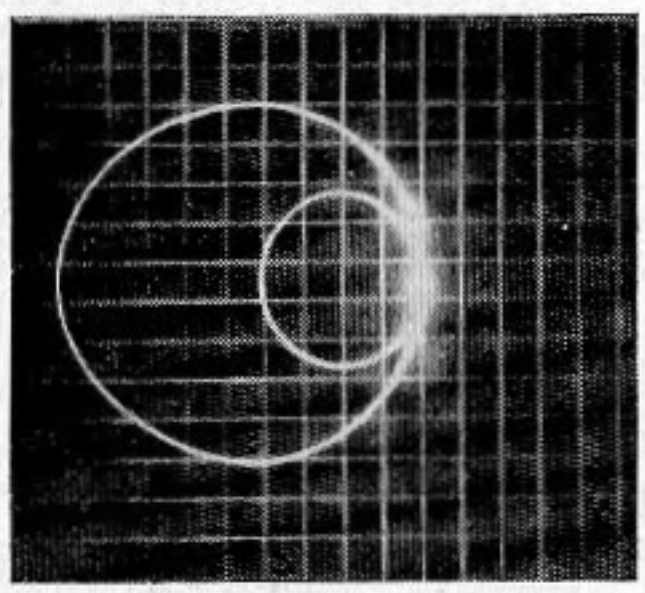
а также перемещаемой «абсолютной» частотной отметки, с помощью которой осуществляется привязка шкалы частот [5]. Упрощенная функциональная схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1, где *1* — смесители, *2* — гетеродин, *3* — фильтры суммарной частоты, *4* — фазовращатель, *5* — умножители, *6* — усилитель мощности, *7* — фильтры разно-



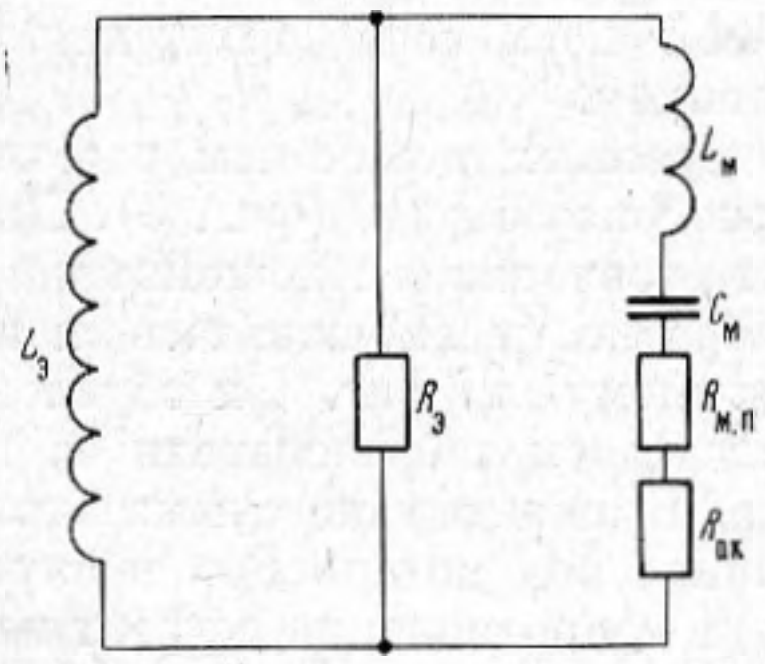
Фиг. 1

стной частоты, *8* — схема сравнения, *9* — регулируемый усилитель, *10* — фазовые детекторы, *11* — индикатор, *12* — источник опорного напряжения, *13* — генератор качающейся частоты, *14* — система частотной калибровки.

Установка была применена для определения нагрузки в процессе ультразвукового резания стекла на станке модели 4770У. Двухполуволновая колебательная система станка с резонансной частотой $f_р \approx 22$ *кгц* состояла из ферритового преобразователя типа 2С-25-С [6] и ступенчатого кон-



Фиг. 2

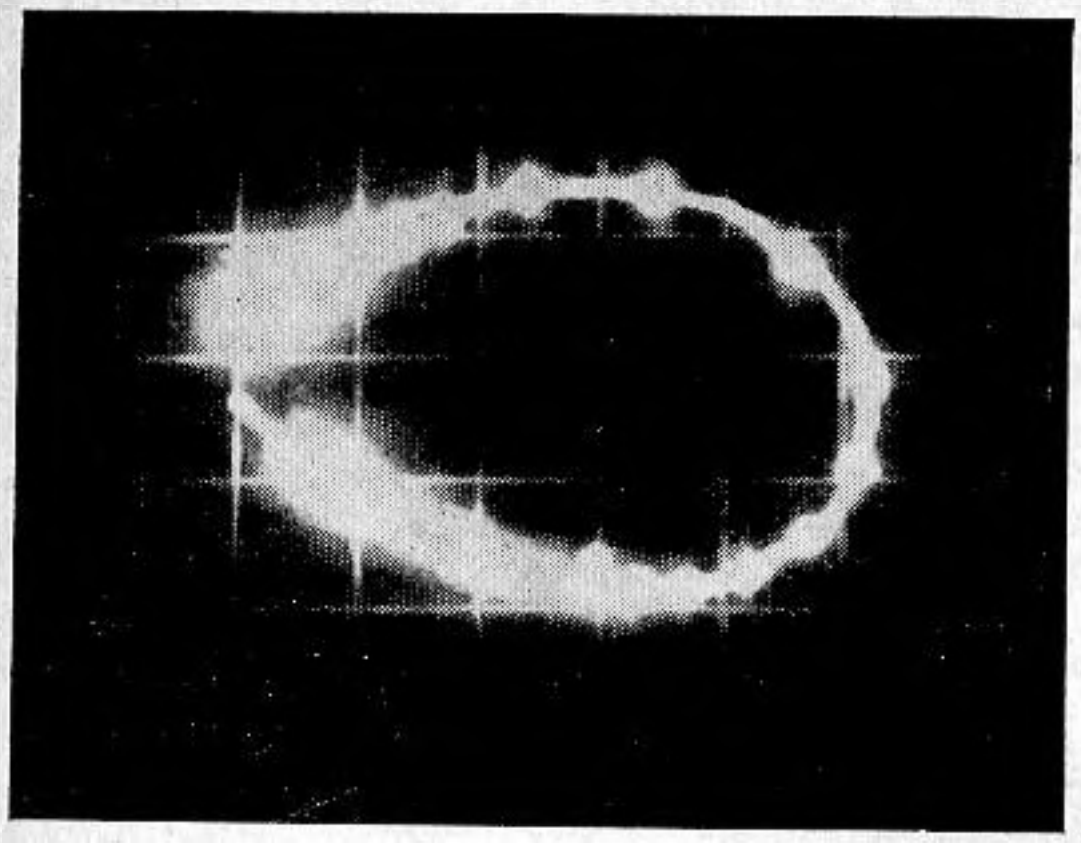


Фиг. 3

центратора с диаметрами ступеней 40 и 15 *мм*, изготовленного из титанового сплава; к рабочему торцу концентратора привинчивались сменные стальные инструменты диаметром $d = 2$, 5 и 15 *мм*. Крепление колебательной системы осуществлялось тремя заостренными шпильками, расположенными вблизи узловой плоскости концентратора. Сила прижима F регулировалась в пределах от 70 до 700 *г* сменой грузов, поднимающих с помощью блочной системы стол станка с находящимся на нем обрабатываемым образцом. Для обработки использовалась абразивная суспензия карбида бора в воде.

Импеданц-диаграммы снимались при постоянной величине возбуждающего тока I. Действующее значение I устанавливалось равным 0,55 *а* (при $d = 2$ *мм* и $d = 5$ *мм*) и 0,8 *а* (при $d = 15$ *мм*). Соответственные

значения амплитуды колебаний инструмента A, измеренные бесконтактным виброметром или микроскопом были в отсутствии нагрузки 18 и 30 *мк*, а потребляемая преобразователем электрическая мощность 25—30 *вт* и 40—60 *вт*. Наличие нагрузки сказывалось на величине мощности лишь для $d = 15$ *мм*. При проведении измерений испытания нагруженного преобразователя чередовались с испытаниями в режиме холостого хода с целью контроля воспроизводимости результатов и разделения влияний на импеданц-диаграммы акустической нагрузки и нагревания со временем колебательной системы. Пример импеданц-диаграмм для свободного и нагруженного состояния приведен на фиг. 2. В зависимости от добротности резонансной системы девиация рабочей частоты была 0,5, 1 и 3 *кгц*, частотные интервалы между калибрационными отметками составляли соответственно 5, 10 или 30 *гц*. Источником эталонной частоты для «абсолютной» частотной отметки служил синтезатор частот типа Г3-44 с точностью установки частоты 1 *гц*. По импеданц-диаграммам, наблюдаемым на экране электронно-лучевой трубки, определялась резонансная частота преобразователя $f_р$, ширина полосы пропускания резонансной системы $\Delta f_р$, активная $R_э$ и реактивная $2\pi f_р L_э$ компоненты импеданца зажатого преобразователя (в точке замыкания петли динамического импеданца) и диаметр окружности динамического импеданца в омах. Масштабный коэффициент изображения в *ом / см* периодически проверялся путем калибровки чувствительности установки, выполняемой по методу замещения измеряемого импеданца образцовым сопротивлением.



Фиг. 4

По измеренным величинам рассчитывались параметры эквивалентной схемы преобразователя (фиг. 3). Для ненагруженного преобразователя ход расчета совпадал с изложенным в работе [7]. При нагрузке из-за снижения добротности наблюдалось искажение импеданц-диаграмм, подобное показанному на фиг. 4 и обусловленное изменением величины импеданца зажатого преобразователя за время обхода кривой динамического импеданца. В этом случае сумма эквивалентных сопротивлений собственных механических потерь $R_{м.п}$ и акустической нагрузки $R_{ак}$ вычислялась по величине сопротивления эффективной массы $L_м$, определенной для свободного преобразователя, и механической добротности $Q_р$, вычисленной по величине $f_р$ и $\Delta f_р$:

$$Q_р = \frac{f_р}{\Delta f_р}; \qquad R_{м.п} + R_{ак} = \frac{2\pi f_р L_м}{Q_р}.$$

В результате измерений для $R_э$ и $2\pi f_р L_э$ были получены соответственно значения 1, 5 и 30 *ом*. Значения резонансной частоты $f_р$ лежали в пределах 22 215—22 450 *гц*; абсолютное значение изменения ее под нагрузкой составляло от 5 *гц* при $d = 2$ *мм* до 50 *гц* при $d = 15$ *мм*, знак этого изменения свидетельствовал об упругом характере реактивного сопротивления нагрузки. Вычисленные по результатам измерений значения Q, $R_{м.п}$ и $R_{ак}$, отнесенные к давлению прижима $p = \frac{F}{\pi d^2/4}$, даны в таблице.

Там же приведены рассчитанные по величине параметров эквивалентной схемы значения механоакустического $\eta_{м.а}$ и электроакустического $\eta_{э.а}$ коэффициентов полезного действия и значения истинного механического сопротивления акустической нагрузки в процессе резания стекла $r_{ак}$ и удельного акустического сопротивления $r_{ак} / \pi d^2 / 4$.

d, *мм*	p, *г/см²*	$Q_р$	$R_{м.п}$, *ом*	$R_{ак}$, *ом*	$\eta_{м.а}$, %	$\eta_{э.а}$, %	$r_{ак}$, *г/сек*	$r_{ак}/\pi d^2/4$, *г/см²сек*
2	0	410	6	0	—	—	—	—
—	2200	375	6	0,7	12	9,5	$3{,}9\cdot10^2$	$1{,}2\cdot10^4$
—	4400	375	6	0,7	12	8	$3{,}9\cdot10^2$	$1{,}2\cdot10^4$
—	10000	375	6	0,7	12	8	$3{,}9\cdot10^2$	$1{,}2\cdot10^4$
5	0	370	7,5	0	—	—	—	—
—	700	320	7,5	0,5	6	5	$2{,}8\cdot10^2$	$1{,}4\cdot10^3$
—	1700	300	7,5	1,0	12	10	$5{,}6\cdot10^2$	$2{,}8\cdot10^3$
—	2700	300	7,5	2,0	20	18	$1{,}1\cdot10^3$	$5{,}5\cdot10^3$
—	3600	320	7,5	2,0	20	18	$1{,}1\cdot10^3$	$5{,}5\cdot10^3$
15	0	400	6,75	0	—	—	—	—
—	200	220	6,75	6,75	50	45	$3{,}8\cdot10^3$	$2{,}5\cdot10^3$
—	360	250	6,75	8,5	58	53	$4{,}8\cdot10^3$	$3{,}1\cdot10^3$
—	460	200	6,75	10,2	62	57	$5{,}7\cdot10^3$	$3{,}7\cdot10^3$
15	Нагрузка на воду	110	7,5	21	74	70	$12\cdot10^3$	$8\cdot10^3$

Величина $r_{ак}$ вычислялась как $r_{ак} = R_{ак} / \varkappa^2$, где $\varkappa = nk_{э.м}$, n — коэффициент усиления концентратора, $k_{э.м}$ — коэффициент электромеханической трансформации, зависящий от $f_р$, числа витков обмотки, магнитострикционной константы и геометрических параметров. Ввиду того, что определение величины $\varkappa$ расчетным путем дает весьма заметную погрешность, эта величина определялась, как и в работе [8], экспериментально, по величине колебательной скорости на рабочем торце ненагруженной колебательной системы — $2\pi f_р A$ и тока в «механической» ветви эквивалентной схемы $I_м$: $\varkappa = 2\pi f_р A / I_м$. Значение $I_м$ в свою очередь вычислялось по величине измеренного тока I и парметрам эквивалентной схемы. Величине $A = 18$ *мк* соответствовал ток $I_м = 1{,}85$ *а*, откуда для $\varkappa$ было получено значение $1{,}4\cdot10^3$ CgSM.

Для сравнения производилось также погружение инструмента с $d = 15$ *мм* в воду; данные для этого случая приведены в последней строке таблицы. Расчет значения $r_{ак}$ при нагрузке на воду с учетом отношения d к длине волны [9] дает величину $5\cdot10^4$. Заниженное по сравнению с расчетным значение $r_{ак}$ в таблице может быть объяснено наличием кавитации.

Из данных таблицы видно, что удельное сопротивление акустической нагрузки при резании стекла того же порядка или меньше, чем при нагрузке той же колебательной системы на воду. С ростом давления прижима величина $r_{ак}$ возрастает. При малых диаметрах инструмента удельное акустическое сопротивление нагрузки больше, чем при больших, но при этом имеет место и бóльшее давление прижима. Следует отметить, что скорость резания стекла в процессе испытаний была удовлетворительной для практичского применения и составляла 2 *мм / мин* при $d = 5$ *мм* и 0,5 *мм / мин* при $d = 15$ *мм*.

Рассматривая акустическую нагрузку в процессе резания стекла с точки зрения влияния ее на колебательную систему можно отметить, что вносимое ею сопротивление невелико: для высокодобротной колебательной системы с ферритовым преобразователем оно того же порядка или даже меньше сопротивления ее собственных механических потерь. Соответственно, и электроакустический коэффициент полезного действия преобразователей при резании практически не превышает 50%.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Голямина. Исследование магнитострикционных ферритов в качестве материала для ультразвуковых излучателей (канд. диссертация). М., Акустический ин-т АН СССР, 1967.
2. E. Mori Measurement of mechanical load impedance on ultrasonic machining. J. Acoust. Soc. Japan, 1955, 11, 4, 328—247.
3. З. И. Поляков. Определение величины нагрузки при размерной ультразвуковой обработке. Доклад на VI Всес. Акуст. конференции, М., 1968.
4. С. А. Бойдек. Разработка и исследование методов испытаний электроакустических преобразователей по входному импедансу (канд. диссертация). М., Акустический ин-т АН СССР, 1970.
5. С. А. Бойдек, В. Г. Янов. Способ калибровки по частоте круговых диаграмм электроакустических преобразователей. Авт. свид. № 214212. Бюл. изобретений, 1968, № 11.
6. Составные сердечники из феррита марки Ф-21. Технические условия. Изд. Акустического ин-та АН СССР, М., 1966.
7. Н. А. Евдокимов. Исследование ультразвуковых вибраторов по входному сопротивлению. Изв. ЛЭТИ, 1959, 37, 249—261.
8. И. П. Голямина, Л. И. Ганева, Р. Н. Астахова. Применение высокодобротных колебательных систем для сварки синтетических тканей. Сб. трудов МВТУ им. Баумана, 1970, 10, 68—75.
9. В. В. Фурдуев. Электроакустика, стр. 110. М., Связьиздат, 1947.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
6 июля 1970 г.