

Н. А. Шульга, В. Л. Карлаш

**ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУД И ФАЗ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ**

*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАНУ,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: karlashv@ukr.net*

Abstract. The results obtained for the problem of forced electromechanical vibrations of piezoceramic semi-discs in some range of frequencies are systemized and generalized. An essential attention is drawn to new experimental methods of studying the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of vibrations.

Key words: piezoceramic semi-disc, forced vibrations, full admittance, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics, phase relations.

Введение.

Проблемы резонансных и вынужденных колебаний пьезоэлектрических тел продолжают оставаться в центре внимания ученых в течение многих десятилетий, что обусловлено высокой эффективностью электромеханического преобразования энергии [1 – 5, 7 – 9, 11 – 16, 18 – 30 и др.]. В экспериментах с пьезорезонаторами непосредственно измеряются масса, статическая емкость, геометрические размеры, характеристические частоты (резонансные и антирезонансные) и падения электрического потенциала на пьезоэлементе и (или) нагрузочном резисторе [7 – 9, 11 – 15, 19 – 23 и др.]. На базе таких измерений по различным методикам вычисляются компоненты полной проводимости, а также активные (реальные) и реактивные (мнимые) компоненты материальных констант. Прямых методов измерения ни активных, ни реактивных компонент полной проводимости не существует и поэтому приходится определять их косвенными способами – путем расчетов по различным приближенным формулам.

Недавние исследования [28 – 30] показали, что поведение пьезорезонаторов при больших мощностях сильно зависит от способа электрического нагружения. АЧХ полной проводимости в режиме заданного напряжения (напряжения постоянной амплитуды) отличаются значительной нелинейностью, вплоть до срывов и прыжков, тогда как в режиме заданного тока (тока постоянной амплитуды) такой нелинейности нет [30].

Поиски путей измерения электроупругих и вязкоупругих коэффициентов пьезорезонаторов продолжают. В работе [5] описана методика определения добротности и пьезомодуля путем дифференцирования АЧХ активного компонента полной проводимости по частоте. Авторы [1] предложили интересную экспериментально-расчетную методику определения активных частей электроупругих материальных констант пьезокерамики, основанную на измерениях резонансных частот различных мод колебаний одного и того же образца в виде прямоугольного стержня с последующим вырезанием из него квадратной пластины. В работах [25, 26] показано, что величины добротности колебаний на резонансе Q_a и антирезонансе Q_b различны, причем $Q_a < Q_b$.

Настоящая статья посвящена дальнейшему развитию экспериментальных методик, включая поиски путей изучения фазово-частотных зависимостей в диапазоне частот, обобщению и сопоставлению существующих методик резонанса-антирезонанса, а также оценке точности получаемых результатов для некоторых наиболее часто используемых параметров. Показано, в частности, что классическая схема четырехполюсника Мэсона обеспечивает приемлемый уровень погрешностей лишь на характеристических частотах, тогда как в интервалах частот ниже резонансной и между соседними резонансами возникают значительные фазовые сдвиги между током и падением потенциала в пьезоэлементе. Уменьшить влияние фазовых сдвигов позволяет усовершенствованная схема Мэсона с дополнительным коммутатором. Совместное применение методов резонанса-антирезонанса [4, 14, 21] и пьезотрансформаторного датчика [8, 13, 18, 19] существенно упрощает проведение экспериментальных исследований и повышает их точность.

§1. Реакция пьезокерамического элемента на внешнее электрическое воздействие.

Существует несколько методик измерения резонансных частот при колебаниях пьезоэлектрических элементов конструкций. Все они являются приближенными. Наиболее часто в эксперименте используют схему пассивного четырехполюсника (так называемая схема Мэсона), в которой пьезоэлемент включается последовательно с некоторым нагрузочным резистором (рис.1, а). Достоинства и недостатки этой методики подробно изложены в [7, 8, 14, 20].

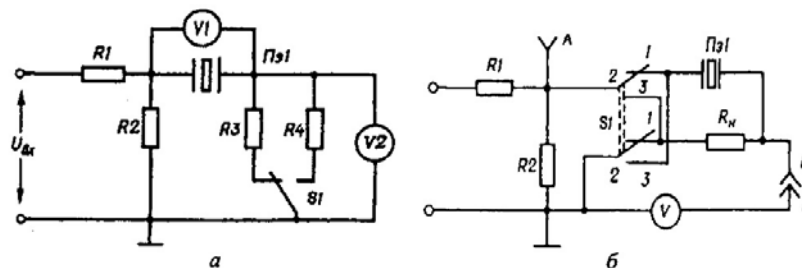


Рис. 1

В работе [21] рассмотрены амплитудно-частотные характеристики полной проводимости тонкого пьезокерамического полу-диска в диапазоне частот 20 – 100 кГц, полученные в модернизированной схеме Мэсона (рис.1, б). Модернизация заключается в дополнении схемы Мэсона коммутатором, позволившем переключать точку «заземления» измерительной части. Становится возможным измерять падение потенциала поочередно либо на пьезоэлементе, либо на нагрузке.

Чтобы возбудить в пьезоэлементе механические колебания к его электродам необходимо подвести от внешнего ультразвукового генератора некоторую разность электрических потенциалов. Под действием обратного пьезоэффекта электрическое поле вызывает в пьезоэлементе механическое деформирование. Частота электромеханических колебаний совпадает с частотой возбуждающего поля. Приложенная к пьезоэлементу разность потенциалов U_{pe} вызывает в нем протекание тока I_{pe} . Известно, что измерить падение потенциала можно при помощи вольтметра, а ток – при помощи амперметра [6, 10, 12]. Вольтметр всегда включается параллельно к изучаемой электрической цепи, амперметр вводится в нее последовательно. Ни вольтметр, ни амперметр не должны заметно влиять на измеряемую величину. По этой причине внутреннее сопротивление вольтметра должно быть во много раз больше, чем сопротивление изучаемой цепи, чтобы не исказить величину тока. Амперметр, наоборот, должен обладать очень малым собственным сопротивлением, чтобы не исказить величину измеряемого падения потенциала. Отношение тока в цепи к падению потенциала на ней есть, по определению, полная проводимость или адмиттанс цепи Y_{pe}

$$Y_{pe} = I_{pe} / U_{pe} \quad (1)$$

Измерить непосредственно падение потенциала и ток в цепи пьезоэлемента невозможно, ибо нет ни амперметров, ни вольтметров, способных работать на ультразвуковых частотах. Ток через пьезоэлемент измеряется косвенным способом по падению потенциала на специальном резисторе, включенном последовательно. В схеме Мэсона указываются обычно два вольтметра [3, 8, 11, 13, 19], один из которых включен параллельно пьезоэлементу, а второй – параллельно нагрузочному резистору.

В процессе перестройки генератора показания обоих вольтметров изменяются, но векторная сумма их всегда совпадает с падением потенциала U_{R2} на выходном резисторе $R2$ согласующего делителя. По этой причине один из вольтметров иногда включается параллельно к резистору $R2$, а падение потенциала на пьезоэлементе берется, как разность падений на резисторе $R2$ и на нагрузочном резисторе. По мере возрастания частоты ток через пьезоэлемент увеличивается и увеличивается падение напряжения на нагрузочном резисторе. Вдали от резонанса (на низкой частоте) ток через пьезоэлемент связан с перезарядом его статической емкости и с увеличением емкостной проводимости этой емкости с ростом частоты. Статическая емкость пьезоэлемента образуется его основными электродами, нанесенными, чаще всего, на главные поверхности. Чем ближе частота генератора к одному из резонансов пьезоэлемента, тем более резкие изменения в показаниях вольтметров наблюдаются. На частоте f_m максимальной входной проводимости Y_m , близкой к резонансной частоте f_r , падение напряжения U_m на резисторе $R3$ достигает максимума, во много раз превосходящего емкостную компоненту. На частоте f_n минимума полной проводимости Y_n , близкой к антирезонансной частоте f_a , падение напряжения U_n на резисторе $R4$ достигает минимума. Полная проводимость пьезоэлемента на любой частоте создается совместным действием пьезоэффекта и статической емкости. Частота максимального падения потенциала на нагрузочном резисторе немного отличается от резонансной частоты из-за влияния собственной статической емкости пьезоэлемента.

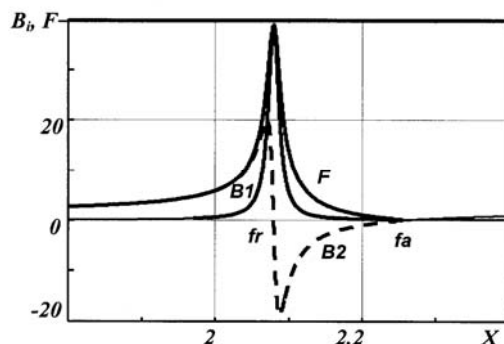


Рис. 2

Полная проводимость Y пьезоэлектрического элемента состоит из действительной G (активной) и мнимой B (реактивной) составляющих. Например, полная проводимость тонкого пьезокерамического диска со сплошными электродами на главных поверхностях (рис. 2) до первого радиального резонанса полностью определяется реактивной проводимостью статической емкости пьезоэлемента C_0 и только вблизи от резонанса к ней векторным образом добавляется активная проводимость, создаваемая механическими напряжениями [14]. В некоторой точке реактивная компонента достигает максимальной величины, одинаковой с величиной активной компоненты. Затем активная составляющая продолжает возрастать, а реактивная – уменьшаться. На резонансной частоте активная компонента достигает максимума, тогда как реактивная падает до нуля. Далее реактивная составляющая изменяет знак, проходит через отрицательный максимум и снижается до нуля. Активная составляющая также снижается

до нуля. Полная проводимость во второй точке перехода реактивной составляющей через нуль достигает минимальной величины, затем снова становится реактивной проводимостью емкостного типа. Из рисунка также следует, что точки максимумов активной и полной компонент практически совпадают между собой, а также с первой точкой перехода через нуль реактивной компоненты. Совпадают также точки минимумов активной и полной компонент проводимости со второй точкой перехода через нуль реактивной компоненты. Степень «остроты» максимума и минимума полной проводимости неодинакова, максимум намного «острее». Именно по этой причине (для более четкой регистрации точек минимумов) в экспериментах с применением схемы Мэзона приходится применять нагрузочные резисторы R_3 и R_4 разной величины. Обычно сопротивление R_3 составляет несколько единиц Ом, а сопротивление R_4 может достигать нескольких сотен Ом.

Падение потенциала на пьезоэлементе проще всего определять косвенно как разность между падением потенциала на выходном резисторе согласующего делителя R_2 (входная разность потенциалов измерительной части схемы) и падением потенциала на нагрузочном резисторе

$$U_{pe} \cong U_{R_2} - U_R, \quad (2)$$

так что для полной проводимости пьезоэлемента на любой частоте получаем приближенную формулу

$$Y_{pe} = U_R / R(U_{R_2} - U_R). \quad (3)$$

Эта формула на характеристических частотах (резонансы и антирезонансы) обеспечивает достаточную для эксперимента точность, но вне этих частот возможны заметные фазовые искажения.

При пользовании усовершенствованной схемой Мэзона формула (1) для полной проводимости приводится к виду

$$Y_{pe} = U_R / (U_{pe} R). \quad (4)$$

Фазовые сдвиги между током в пьезоэлементе и падением потенциала на нем здесь те же, что и раньше, но они не влияют на точность измерений.

Хорошие результаты дает замена нагрузочного резистора конденсатором с емкостью C_n . В этом случае полная проводимость Y_{pe} пьезоэлемента на частоте f определяется через отношение падений потенциала на емкости U_c и пьезоэлементе U_{pe} по формуле

$$Y_{pe} = 2\pi f C_n U_c / U_{pe} U_{pe} \quad (5)$$

Емкость C_n может подключаться в измерительной части схемы Мэзона или ее вариантах, как и нагрузочный резистор, либо нагрузкой, либо элементом передачи. Проводились измерения падения потенциала на конденсаторе и пьезокерамическом полудиске для нескольких величин емкости C_n – одинаковой со статической емкостью C_0 , а также намного меньше и намного больше этой величины. В случае, когда конденсатор являлся элементом передачи и измерялось падение потенциала на пьезоэлементе, для расчета проводимости применялась приближенная формула

$$Y_{pe} = 2\pi f C (U_{R_2} - U_{pe}) / U_{pe} \quad (6)$$

§2. АЧХ полной проводимости пьезоэлементов при резистивных и емкостных нагрузках.

При прохождении электрического тока ультразвуковой частоты через пьезоэлемент и включенный последовательно с ним резистор или конденсатор возникают фазовые сдвиги между токами и напряжениями, которые влияют на результаты измерений. Особенно наглядно взаимодействие емкостной и механической составляющих падения потенциала на элементах измерительной части усовершенствованной схемы

Мэзона наблюдается в много резонансных системах, таких, например, как пьезокерамический полудиск [21], когда в сравнительно узком частотном диапазоне 20 – 100 кГц существуют несколько электромеханических резонансов разной силы (рис. 3). На рис.3, а представлены падения потенциала на нагрузочном резисторе 110 Ом (сплошные линии) либо на конденсаторе постоянной емкости 15 830 пФ, равной по величине собственной статической емкости полудиска (пунктирные линии). Рис.3, б иллюстрирует АЧХ полной проводимости полудиска совместно с резистором 55 Ом или конденсатором 15 830 пФ [21]. На входе измерительной части схемы на всех частотах поддерживалась разность потенциалов 100 мВ. Заметными являются семь резонансов различной интенсивности. Максимумы полной проводимости соответствуют максимумам падения потенциала. Установлено, что увеличение емкости нагрузочного конденсатора в несколько раз (до 105 840 пФ) снижает амплитуду резонансных выбросов, но не изменяет ни АЧХ, ни величины полной проводимости. Более того, величины полной проводимости на разных частотах, вычисленные с применением формул (4) и (5), практически совпадают (рис.3, в).

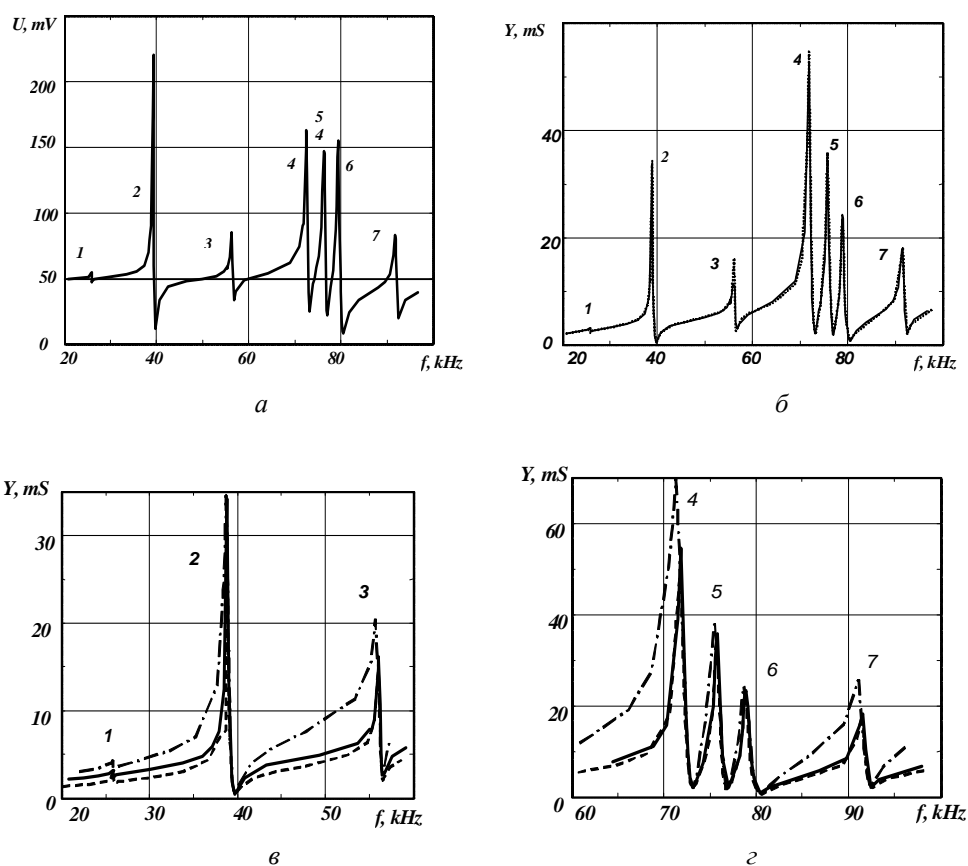


Рис. 3

Разделим частотный диапазон на два участка 20 – 60 (рис.3, в) и 60 – 100 кГц (рис. 3, г). Построим кривые полной проводимости для трех схем измерения – нагрузочный резистор 110 Ом в традиционной схеме Мэзона (штрих пунктирная линия), ограничительный резистор 1000 Ом (пунктирная линия) и нагрузочный резистор 55 Ом (сплошная линия) в усовершенствованной схеме. В первом случае падение потенциала на пьезоэлементе определяется приблизительно как разность между входным сигналом и падением потенциала на нагрузочном резисторе. Полная проводимость рассчитывается по приближенной формуле (3). Во втором случае падение потенциала на

ограничительном резисторе приближенно определяется как разность между входным сигналом и падением потенциала на пьезоэлементе

$$U_R = U_{R2} - U_{pe} \quad (7)$$

и полная проводимость определяется по приближенной формуле

$$Y = \frac{U_{R2} - U_{pe}}{RU_{pe}} \quad (8)$$

В третьем случае применялась уточненная формула (4), так как падение потенциала на пьезоэлементе и нагрузочном резисторе измерялось в схеме с коммутатором независимо, поочередно и с одинаково высокой точностью.

Сравнивая графики рис.3, в, г с кривыми рис.3, б, нетрудно заметить, что и уточненная формула (4), и приближенные выражения (3) и (8) обеспечивают вычисление полной проводимости пьезоэлемента с удовлетворительной точностью. В точках минимума результаты расчета по различным формулам практически совпадают. Наибольшее расхождение между полученными по разным формулам результатами имеет место между соседними резонансами. На многих частотах формула (3) дает завышенное значение проводимости почти в два раза, тогда как формула (8) занижает величину полной проводимости в тех же точках на 10 – 15 %. В интервалах частот поблизости от резонансов, кроме очень слабого первого, результаты расчетов по формулам (4) и (8) практически одинаковы.

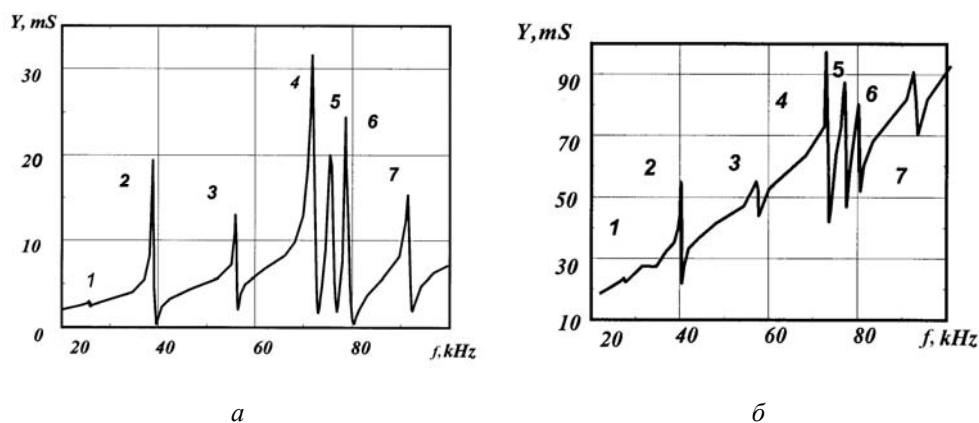


Рис. 4

На рис. 4 представлены АЧХ полной проводимости пьезокерамического полудиска для двух особенных случаев емкостной нагрузки – конденсатора передачи емкостью 600 пФ (рис.4, а) и конденсатора емкостью 105 840 пФ, включенного параллельно к пьезоэлементу при нагрузочном резисторе 3 Ома (рис. 4, б). Для вычислений применялись приближенные формулы (6) и (8) соответственно. По сравнению с другими способами возбуждения колебаний при включении последовательно с пьезоэлементом небольшой емкости (значительно меньшей от его собственной статической емкости) амплитуда резонансных выбросов снизилась на 30 – 50 % и стали более «острыми» точки минимумов. При подключении параллельно к пьезоэлементу конденсатора большой емкости полная проводимость такого образования увеличилась в несколько раз и преобладающей становится емкостная компонента. Слабый первый резонанс регистрируется плохо. Остальные резонансы сохраняют как свое пространственное положение, так и относительную интенсивность. Отсюда следует, что резонансные явления в пьезокерамике определяются ее собственными электромеханическими свойствами и повлиять на них пассивными внешними элементами трудно.

§3. Фазовые сдвиги между компонентами потенциала.

Как отмечалось выше, введение в схему Мэзона дополнительного коммутатора позволяет измерять падение потенциала U_{pe} на исследуемом пьезоэлементе $ПЭ$ и нагрузочном резисторе R_n или конденсаторе C_n с одинаково высокой точностью на любой частоте f . На вход измерительной части схемы поступает с согласующего делителя входная разность потенциала $U_{ex} = U_{R2}$, которая выделяется на резисторе $R2$. Имеем, таким образом, три компоненты потенциала: U_{ex} , U_{pe} и U_R или U_c . Зная три стороны треугольника, по теореме косинусов нетрудно вычислить углы при вершинах, в частности, напротив стороны U_{ex} будет угол, который характеризует фазовый сдвиг между падением потенциала на пьезоэлементе и последовательно с ним включенном резисторе или конденсаторе

$$\cos \alpha = (U_{pe}^2 + U_R^2 - U_{ex}^2) / (2 * U_{pe} * U_R) . \quad (9)$$

В табл. 1 представлены результаты измерений и вычислений для упомянутого выше пьезокерамического полудиска на восьми произвольно выбранных частотах (в килогерцах) вблизи его первого сильного резонанса. На всех частотах вычисленные углы имеют отрицательные величины. Это означает, что они отсчитываются от 180^0 , т.е. являются тупыми. Угол α образован сторонами U_{pe} и U_R треугольника. Он расположен напротив стороны U_{ex} и характеризует сдвиг фаз между падением потенциала на пьезоэлементе и проходящим через него электрическим током. Известно, что в резисторе между током и падением потенциала фазовых сдвигов нет. Угол β образован сторонами U_{ex} и U_R треугольника. Он расположен напротив стороны U_{pe} и характеризует сдвиг фаз между входной разностью потенциалов и проходящим через пьезоэлемент ток. Угол γ образован сторонами U_{ex} и U_{pe} треугольника. Он расположен напротив стороны U_R и характеризует сдвиг фаз между входной разностью потенциалов и падением потенциала на пьезоэлементе.

Таблица 1

Частота	35,967	37,933	38,479	38,742	38,846	39,027	39,188	39,686
U_{pe} , мВ	94	86	73	42	34	64	84	98
U_R , мВ	25	36	50	65	64	45	26	3
U_{ex} , мВ	100	100	100	100	100	100	100	100
Y , мС	4,83	7,61	12,45	28,14	34,22	12,78	5,63	0,487
$\cos \alpha$	-0,1147	-0,2112	-0,2974	-0,7346	-1,0910	-0,6711	-0,5192	-0,6633
α	-83° 20'	-77° 50'	-72° 40'	-42° 40'	-	-47° 50'	-58° 30'	-48° 50'
α^*	-78°	-77°	-73°	-40°	-	-44°	-54°	-55°
$\cos \beta$	0,3578	0,5417	0,7171	0,9585	-	0,8811	0,6962	0,68
β	69°	57° 10'	44° 10'	16° 40'	-	28° 10'	45° 50'	47° 30'
β^*	62°	58°	44°	18°	-	26°	45°	-
$\cos \gamma$	0,9687	0,9360	0,8787	0,8975	-	0,8430	0,975	0,9996
γ	14° 10'	20° 30'	28° 30'	26° 10'	-	19° 20'	13°	1° 40'
γ^*	16°	21°	29°	25°	-	18°	13°	-
$\alpha + \beta + \gamma$	179° 50'	179° 50'	180°	180° 10'	-	179° 20'	180° 10'	180° 40'
$\alpha^* + \beta^* + \gamma^*$	180°	182°	180°	183°	-	180°	184°	-

Звездочкой помечены значения углов, измеренные транспортиром после геометрического построения. Расхождение данных, полученных графическим и расчетным путями, не превышает 10%. В одной точке вычисленная величина $\cos \alpha$ превысила

единицу, что не имеет смысла и вызвано погрешностями измерения падений потенциала. Это частота максимальной проводимости, на которой фазовые сдвиги отсутствуют. Полная проводимость вычислялась по формуле (4). В двух нижних строках таблицы приведены суммы вычисленных и измеренных углов, которые равны 180° или близки к этой величине.

Из табл. 1 следует, что фазовый угол между падениями потенциала U_{pe} и U_R по мере приближения к резонансной частоте 38, 846 кГц увеличивается и стремится к 180° , а не к нулю, как следует из физических соображений. Дело в том, что в усовершенствованной схеме перевод коммутатора из первого положения во второе приводит к изменению направления тока в пьезоэлементе и резисторе на противоположное. Это обстоятельство никоим образом не влияет на электромеханические процессы в пьезоэлементе, но его следует помнить при интерпретации результатов исследований.

В табл. 2 представлены результаты измерений и вычислений для того же полудиска в том же частотном диапазоне после замены нагрузочного резистора 55 Ом конденсатором 15 830 пФ. Полные проводимости рассчитаны по формуле (5). Пропуски в таблице сделаны в тех случаях, когда сумма двух сторон треугольника меньше третьей стороны или одна из сторон во много раз меньше двух других. Восемь частот выбраны произвольно поблизости от максимальной и минимальной проводимостей. При замене резистивной нагрузки на емкостную нагрузку появляются дополнительные фазовые сдвиги между падениями потенциала на пьезоэлементе U_{pe} , конденсаторе U_c и выходном резисторе согласующего делителя U_{ex} .

Таблица 2

Частота	38,551	38,749	39,035	39,112	39,270	39,377	39,450	39,698
U_{pe} , мВ	20	12	44	105	200	170	140	96
U_c , мВ	79	90	132	175	210	100	60	12
U_{ex} , мВ	100	100	100	100	100	100	100	100
Y , мС	15,14	28,89	11,6	6,493	4,094	2,302	1,678	0,493
$\cos \alpha$	-1,0629	-0,8129	0,8492	0,8612	0,8821	0,85	0,7857	-0,2783
α	-	-35°40'	31°40'	30°30'	28°	31°50'	38°20'	-79°40'
α^*	-	-27°	38°	30°	27°	32°	42°	-75°
$\cos \beta$	1,0026	0,9976	0,9655	0,8457	0,3357	-0,4451	-0,5	0,387
β	-	4°	15°10'	32°30'	70°20'	-65°30'	-60°	67°10'
β^*	-	4°	18°	33°	68°	116°	118°	69°
$\cos \gamma$	1,0397	0,8517	-0,6236	-0,4671	0,1405	0,850	0,9286	0,9933
γ	-	31°40'	-51°25'	-62°50'	81°50'	31°50'	21°50'	6°40'
γ^*	-	25°	127°	117°	82°	35°	25°	9°
$\alpha + \beta + \gamma$	-	180°	177°	180°	180°	180°	180°	-
$\alpha^* + \beta^* + \gamma^*$	-	186°	183°	183°	177°	183°	186°	-

В обеих таблицах вычисленные и измеренные величины довольно близки, хотя и вычисления, и геометрические построения являются приблизительными. Основным источником погрешностей является вольтметр, которым измеряется падение потенциала. Нами применялся милливольтметр ВЗ-38 класса 4. Это означает, что при шкале, например, 100 мВ его погрешность составляет ± 4 мВ. Если на этой шкале уровень измеряемого сигнала всего 30 мВ, то относительная погрешность достигнет $(\pm 4 \text{ мВ}/30 \text{ мВ})100\% = 13,3\%$. Увеличить точность измерений позволяет как своевременное переключение шкал вольтметра, так и измерение таких уровней сигнала, при которых стрелка прибора находится вблизи от края шкалы.

Данные таблиц подтверждаются фазово-частотными характеристиками пьезокерамического полудиска (рис. 5), полученными путем геометрических построений. Кривые a , b , g на рисунке соответствуют углам α , β и γ .

Анализ графиков показывает, что сдвиг фаз между падением потенциала на пьезоэлементе и протекающим через него электрическим током (кривая *a*) между соседними резонансами приближается к 100 градусам. В промежутках от резонанса к антирезонансу имеют место резкие изменения фазовых сдвигов от 180 до 120 градусов и снова до 180. Углы β и γ проходят в промежутках между резонансами и соответствующими антирезонансами через минимумы, приближающиеся к нулю градусам. В интервалах между соседними резонансами эти углы приближаются к 65 – 70 и 10 – 15 градусам.

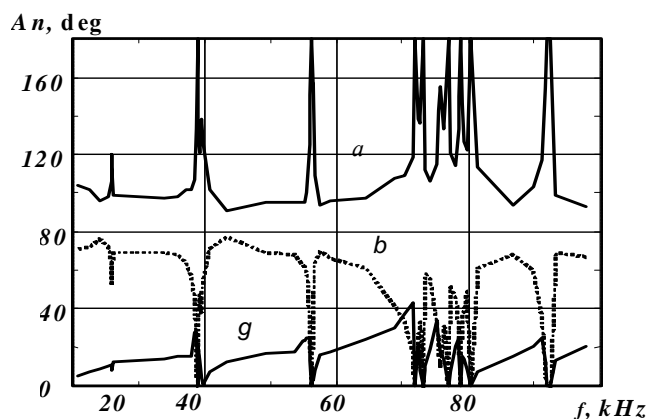


Рис. 5

Следует отметить, что в последующем измеренные падения потенциалов U_{ax} , U_{pe} , U_R и соответствующие им частоты вводились в компьютер и выводились на экран компоненты полной проводимости, косинусы фазовых углов, сами углы, а также компоненты активной, реактивной и мгновенной мощности. Оказалось, что причиной наличия или отсутствия отмеченной авторами работ [27 – 29] нелинейности является увеличение или уменьшение мгновенной мощности при подходе к резонансу. Сказанное, однако, выходит за пределы настоящей статьи и требует отдельной публикации.

§4. Последовательное измерение амплитуд и фаз потенциала.

Воспользоваться теоремой косинусов и формулой (9) можно также при последовательном измерении падений потенциала на пьезоэлементе и нагрузочном резисторе. Соединенные последовательно пьезоэлемент и резистор подключаются к выходному резистору согласующего делителя в традиционной схеме Мэсона так, что «заземляется» либо резистор либо пьезоэлемент. АЧХ падения потенциала снимается независимо сперва на одном из них, затем на другом.

Таблица 3

f , kHz	70	74	75,74	77,13	78	80,98	83,94	86	81,91	90
Y , mS	11,81	21,6	40,7	145	68,9	9,09	2,67	0,66	0,47	1,34
α	91°30'	98°	100°30'	130°30'	136°10'	96°30'	99°20'	113°30'	125°40'	107°
β	36°10'	20°30'	13°30'	2°40'	4°40'	41°40'	65°10'	62°50'	52°	65°20'
γ	48°20'	60°40'	67°20'	46°10'	39°10'	41°40'	15°20'	3°40'	2°20'	8°
α^*	93°	101°	103°	138°	128°	97°	102°	125°	115°	102°
β^*	38°	20°	10°	2°	7°	41°	64°	52°	63°	64°
γ^*	47°	58°	66°	38°	45°	41°	14°	3°	2°	14°

Полученные таким образом зависимости в выбранном диапазоне частот строятся на общем рисунке с использованием одной и той же частотной сетки по горизонтали. На отпечатанном рисунке делаются измерения ординат U_{pe} и U_R на специально выбранных частотах. Третья сторона треугольника U_{ax} в процессе измерений все время поддерживается постоянной амплитуды. Последующая обработка экспериментальных данных такая же, как и в усовершенствованной схеме Мэзона. Табл. 3 и рис. 6 иллюстрируют сказанное для пьезоэлектрически сильного третьего резонанса тонкостенной цилиндрической оболочки 22,2 * 18,2 * 15,8 мм из пьезокерамики ЦТБС-3.

Здесь, как и в случае пьезокерамического полудиска, наиболее резкие изменения фазовых сдвигов наблюдаются вблизи резонансных и антирезонансных частот. В промежутках между этими точками сдвиг по фазе между падением потенциала на пьезоэлементе и токе в нем тот же, что и между соседними резонансами. Этот сдвиг обусловлен действием собственной электрической емкости и близок к 90° .

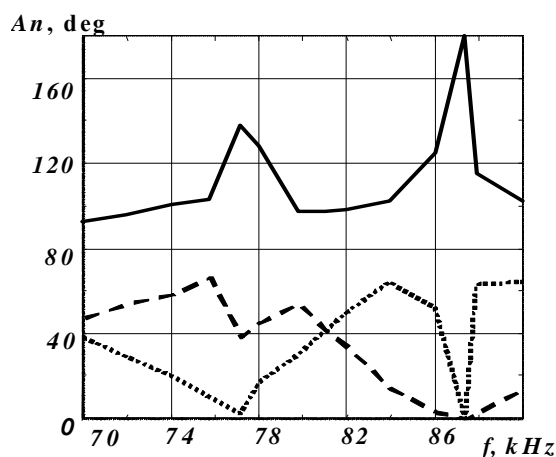


Рис. 6

Амплитуды полной проводимости пьезоэлементов на резонансных частотах можно определять также по величине шунтирующего действия [20], когда пьезоэлемент присоединяется параллельно к выходному резистору R_2 делителя и в той или иной мере шунтирует его своим входным импедансом. На резонансных частотах шунтирующее действие пьезоэлемента наиболее заметно и разность потенциалов на нем снижается в K раз по сравнению с низкими частотами, где шунтирование практически отсутствует. Резонансную проводимость Y_p образца можно определить по приближенной формуле $Y_p (мС) = 10^3 (K - 1) / R_2 (Ом)$, которая получается из закона Ома для участка цепи.

Полную проводимость пьезоэлемента на антирезонансе метод шунтирования, как и метод пьезотрансформаторного датчика [13, 14], не определяет.

Заключение.

На основе проведенного исследования вынужденных электромеханических колебаний тонкого пьезокерамического полудиска в диапазоне частот с применением нескольких различных схем электрического возбуждения колебаний установлено следующее.

1. Поочередное измерение падений потенциала на пьезоэлементе и нагрузочном резисторе или конденсаторе в усовершенствованной схеме Мэзона с коммутатором позволяет определять компоненты полной проводимости и фазовые сдвиги с достаточной для инженерной практики точностью на любой частоте.

2. Схема с ограничительным резистором хорошо определяет компоненты полной проводимости в частотном интервале между резонансом и антирезонансом, а также при подходе к резонансу.

3. Использование конденсатора малой емкости в качестве элемента передачи позволяет повысить точность установки антирезонансных частот.

4. Резонансные свойства пьезокерамики определяются внутренними электромеханическими процессами и не зависят от влияния пассивных внешних элементов.

РЕЗЮМЕ. Систематизовано й узагальнонено наукові результати, отримані при вивченні проблеми вимушених електромеханічних коливань п'єзокерамічних напівдисків у діапазоні частот. Значну увагу приділено новим експериментальним методам дослідження амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик коливань.

1. Акоюн В. А., Соловьев А. Н., Шевцов С. Н. Методы и алгоритм определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамических материалов. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. – 144 с.
2. Безверхий О., Зінчук Л., Карлаш В. Вплив режиму електричного навантаження, сталих напруги або струму на характеристики коливань п'єзокерамічних резонаторів // Фізико-механічне моделювання та інформаційні технології. – 2013. – Вип. 18. – С. 9 – 20.
3. Глоzman И. А. Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1972. – 288 с.
4. ГОСТ 12370-72. Материалы пьезокерамические, методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 28 с.
5. Земляков В. Л., Ключников С.Н. Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям // Измерительная техника. – 2010. – № 3. – С. 38 – 40.
6. Калашиников А. М., Степук Я. В. Основы радиотехники и радиолокации. – М.: Воениздат, 1962. – 368 с.
7. Карлаш В.Л. Электромеханические колебания пьезокерамического полого сфероида с полярным вырезом // Прикл. механика. – 2010. – 46, № 5 – С. 58 – 65.
8. Карлаш В.Л. Методи визначення коефіцієнтів зв'язку і втрат енергії при коливаннях резонаторів із п'єзокераміки // Акуст. вісник. – 2012. – 15, № 4. – С. 24 – 38.
9. Катц Г. В. Магнитные и диэлектрические приборы. Ч. I. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 416 с.
10. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966. – 624 с.
11. Шарапов В.М. и др. Пьезоэлектрические преобразователи: Учеб. пособ. / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко, Т.Ю. Кисиль, М.П. Мусиенко, С.В. Роттэ, И.Б. Чудаева / Под ред. В.М. Шарапова. – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.
12. Шульга Н. А., Болкисев А. М. Колебания пьезоэлектрических тел – К.: Наук. думка, 1990. – 228 с.
13. Шульга М. О., Карлаш В. Л. Резонансні електромеханічні коливання п'єзоелектричних пластин. – К.: Наук. думка, 2008. – 272 с.
14. Шульга М. О., Карлаш В. Л. Вимірювання повної провідності п'єзокерамічних елементів у схемі чотириполюсника Мезона та її варіантах // Тези ІУ Міжнарод. Наук.-техн. Конф. „Датчики, прилади та системи – 2008”. – Черкаси – Гурзуф, 2008. – С. 54 – 56.
15. Шульга М. О., Карлаш В. Л. Амплітудно-фазові характеристики радіальних коливань тонкого п'єзокерамічного диска біля резонансів // Доповіді НАН України. – 2013. – № 9. – С. 80 – 86.
16. Holland R., Eer Nisse E. P. Design of resonant piezoelectric devices. – Cambridge: M.I.T.Press, 1969. – 256 p.
17. IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics. 1961 // Proc. IRE. – 1961. – 49. – P. 1161 – 1169.
18. Karlash V. Longitudinal and lateral vibrations of a planar piezoceramic transformer // Jpn. J. Appl. Phys. – 2005. – 44, N 4A. – P. 1852 – 1856.
19. Karlash V. L. Resonant Electromechanical Vibrations of Piezoelectric Plates // Int. Appl. Mech. – 2005. – 41, N 7. – P. 709 – 747.
20. Karlash V. L. Planar Electroelastic Vibrations of Piezoceramic Rectangular Plate and Half-Disk // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43, N 5. – P. 547 – 553.
21. Karlash V. L. Admittance-Frequency Response of a Thin Piezoceramic Half-Disk // Int. Appl. Mech. – 2009. – 45, N 10. – P. 1120 – 1126.
22. Karlash V. L. Energy losses in piezoceramic resonators and its influence on vibration's characteristics // Electronics and communication. – 2013. – 19, N 2 (79). – P. 82 – 94.

23. *Karlash V. L.* Forced Electromechanical Vibrations of Rectangular Piezoceramic Bars with Sectionalized Electrodes // *Int. Appl. Mech.* – 2013. – **49**, N 3. – P. 360 – 368.
24. *Kirichok I. F.* Resonant Vibrations and Self-Heating of a Clamped Flexible Thermoviscoelastic Beam with Piezoactuators // *Int. Appl. Mech.* – 2014. – **50**, N 4. – P. 421 – 429.
25. *Mezheritsky A. V.* Quality factor of piezoceramics // *Ferroelectrics.* – 2002. – **266**. – P. 277 – 304.
26. *Mezheritsky A. V.* Elastic, dielectric and piezoelectric losses in piezoceramics; how it works all together // *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Frec. Contr.* – 2004. – **51**, N 6. – P. 695 – 797.
27. *Shul'ga N.A., Grigor'eva L.O., Babkova N.O.* Electrically Excited Nonstationary Vibrations of Thin Circular Piezoelectric Plates // *Int. Appl. Mech.* – 2014. – **50**, N 4. – P. 406 – 411.
28. *Uchino K., Zheng J. H., Chen Y. H. et al.* Loss mechanisms and high power piezoelectrics // *J. Mat. Sci.* – 2006. – **41**. – P. 217 – 228.
29. *Uchino K., Zhuang Yu., Ural S. O.* Loss determination methodology for a piezoelectric ceramic: new phenomenological theory and experimental proposals // *J. Adv. Dielectric.* – 2011. – **1**, N 1. – P. 17 – 31.
30. *Ural S.O., Tunodimir S., Zhuang Yu. Uchino K.* Development of a high power piezoelectric characterization system and its application for resonance/antiresonance mode characterization // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2009. – 48 056509.

Поступила 05. 03. 2012

Утверждена в печать 30. 09. 2014

