

В. Л. Карлаш

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

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

**Abstract.** The experimental data are analyzed for the fundamental radial mode of thin piezoceramic disk. It is established that the voltage drops and instant powers are very sensitive to the loading conditions and the admittances, impedances and phase shifts do not depend on them. An approaching to resonance is accompanied in the regime of given current by decreasing the instant power, whereas an approaching to anti-resonance is accompanied by increasing the instant power. An approaching to resonance is accompanied in the regime of given voltage by increasing the instant power, whereas an approaching to anti-resonance is accompanied by decreasing the instant power.

**Key words:** piezoceramic resonator, instant power, admittance, impedance, phase shift, efficiency.

### Введение.

Колебания элементов конструкций из пьезокерамики отличаются высокой связанностью механических деформаций и напряженности электрического поля [1 – 4, 8 – 11, 17]. При экспериментальных исследованиях обычно непосредственно или косвенно измеряются резонансные / антирезонансные частоты и соответствующие им полные проводимости и импедансы. Исследуемый пьезорезонатор включается последовательно с нагрузочным резистором или конденсатором и по падению потенциалов на пьезоэлементе и его нагрузке рассчитываются адмиттансы и импедансы. Чтобы вычислить амплитуды механических смещений, деформаций, напряжений, равно как и электрических адмиттансов и мощностей, необходимо учитывать потери энергии [2, 8 – 11, 25 – 27], которые в настоящее время принимаются состоящими из механических, диэлектрических и пьезоэлектрических компонентов [10, 11, 19 – 22, 25 – 27].

В работах [1, 2, 8, 11, 24] показано, что поведение пьезорезонаторов сильно зависит от условий электрического нагружения и отличается для режимов постоянного по амплитуде (заданного) тока и (или) заданного (постоянного по амплитуде) падения потенциала. Авторы работ [25 – 27] обнаружили в экспериментах с продольными колебаниями прямоугольных пьезокерамических пластин значительную нелинейность амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) полной проводимости (вплоть до прыжков и срывов) вблизи резонансных частот в режиме заданного падения напряжения и отсутствие такой нелинейности в режиме заданного тока. Было также показано, что обеспечить режим заданного тока на антирезонансе при значительных мощностях невозможно. Предлагалось определять резонансные характеристики пьезорезонаторов большой мощности в режиме заданного тока, а антирезонансные – в режиме заданного напряжения.

Настоящее сообщение посвящено анализу экспериментальных данных, полученных автором в интервале частот близости от первой радиальной моды тонкого пьезокерамического диска в усовершенствованной схеме Мэсона [8, 12, 13, 18, 24], а также на его  $R, C, L$  моделях. Измеренные в условиях «как есть» падения электрического потенциала на входе схемы измерений  $U_{in}$ , на пьезоэлементе  $U_{pe}$  и на нагрузочном резисторе  $U_R$  пересчитаны для режимов заданного тока или падения потенциала, а также заданных входной мощности или мощности на пьезоэлементе.

Установлено, что от условий нагружения сильно зависят падения потенциала, входная мощность и мощность, которая выделяется на пьезоэлементе, тогда как адмиттанс, импеданс и фазовые сдвиги между компонентами полной проводимости такой зависимости не проявляют. В режиме заданного тока приближение к резонансу сопровождается снижением мгновенной мощности, а приближение к антирезонансу ведет к увеличению мощности. В режиме заданного падения потенциала все происходит наоборот – приближение к резонансу сопровождается увеличением мгновенной мощности, а приближение к антирезонансу ведет к ее снижению.

### 1. Методика эксперимента, работа с полученными данными.

Заметное отличие между режимами постоянного по амплитуде тока и постоянного по амплитуде напряжения имеется в ультразвуковых приборах высокой мощности, таких как излучатели, пьезодвигатели или трансформаторы.

Авторы [27] полагают, что существуют значительные трудности в определении параметров электромеханической связи при высоких уровнях электрического возбуждения в условиях постоянного по амплитуде электрического напряжения, поскольку наблюдается большая нелинейность АЧХ полной проводимости вблизи резонансов, вплоть до прыжков и срывов. Вместе с тем, хотя в случае заданного постоянного по амплитуде тока на резонансе нелинейность и не наблюдается, обеспечить этот режим на антирезонансе для условий больших мощностей практически невозможно.

Обеспечить в эксперименте режимы заданного тока или заданного напряжения с применением классической схемы пассивного четырехполюсника Мэсона [3, 4, 11, 16] трудно. Предложенные в [12, 13, 18, 24] усовершенствования значительно облегчают процесс измерения амплитуд и повышают их точность. Чтобы исключить влияние измерительной цепи на генератор ультразвуковых колебаний, между ними ставят согласующий резистивный делитель напряжения [3, 4, 16]. Измерительная цепь, состоящая из последовательно включенных пьезоэлемента  $P$ , и нагрузочного резистора  $R_n$ , присоединяется параллельно к выходному резистору согласующего делителя и шунтирует его в той или иной степени. Шунтирующее действие измерительной цепи особенно ощутимо на резонансах и поблизости от них. Если на выходе генератора автоматически поддерживается установленная исследователем разность потенциалов, то в процессе перестройки частоты одновременно изменяются три падения потенциала:  $U_{in}$  – на входе схемы измерений,  $U_{pe}$  – на исследуемом пьезоэлементе и  $U_R$  – на нагрузочном резисторе. Это режим нагружения «как есть». Если одна из трех величин  $U_{in}$ ,  $U_{pe}$  или  $U_R$  поддерживается постоянной по амплитуде, то исследования ведутся в режиме заданного напряжения или тока. Результаты таких экспериментов приведены в работах [1, 2, 8, 20], где показано, что вблизи резонансных частот изменяются только падения потенциала  $U_{in}$ ,  $U_{pe}$  и  $U_R$ , а полные проводимости и фазовые сдвиги между падениями потенциала сохраняются. Тот же результат был получен и при моделировании колебаний пьезорезонатора пассивными  $R$ ,  $C$ ,  $L$  элементами [20, 21]. Опыт автора по проведению экспериментальных исследований показал, что трудоемкий процесс повторных измерений в различных режимах электрического нагружения можно значительно упростить, если принять во внимание, что для слабых уровней электрического поля (примерно до 1 В/мм на резонансах) пьезокерамика остается линейной средой. Измеренные в режиме «как есть» с применением усовершенствованной схемы Мэсона на разных частотах величины  $U_{in}$ ,  $U_{pe}$  и  $U_R$ , (и соответствующие частоты) вводятся в компьютер и строятся АЧХ падений потенциала, адмиттансов, импедансов, фазовых сдвигов, мгновенных мощностей и т.д. Адмиттанс рассчитывается по точной формуле [20, 21]

$$Y_{pe} = \frac{I_{pe}}{U_{pe}} = \frac{U_R}{RU_{pe}} \quad (1)$$

либо по двум приближенным выражениям

$$Y_{pe1} = \frac{U_R}{R(U_{in} - U_R)}; \quad (2)$$

$$Y_{pe2} = \frac{(U_{in} - U_{pe})}{RU_{pe}}. \quad (3)$$

Все три формулы обеспечивают одинаковые результаты на резонансных и антирезонансных частотах и сильно отличаются вдали от этих частот.

Фазовые сдвиги определяются с использованием теоремы косинусов [1, 2, 13, 24]

$$\cos \alpha = \frac{U_{pe}^2 + U_R^2 - U_{in}^2}{2U_{pe}U_R}; \quad \cos \beta = \frac{U_{in}^2 + U_R^2 - U_{pe}^2}{2U_{in}U_R}; \quad \cos \gamma = \frac{U_{in}^2 + U_{pe}^2 - U_R^2}{2U_{in}U_{pe}}, \quad (4)$$

а мгновенная мощность есть произведение тока в пьезоэлементе на падение напряжения на нем

$$P_{pe} = U_{pe}I_{pe} = \frac{U_R U_{pe}}{R}; \quad P_{in} = U_{in}I_{pe} = \frac{U_R U_{in}}{R}; \quad P_R = U_R I_{pe} = \frac{U_R U_R}{R}. \quad (5)$$

Здесь  $P_{in}$  – мгновенная мощность на входе;  $P_{pe}$  – мгновенная мощность на образце;  $P_R$  – мгновенная мощность на нагрузочном резисторе.

Перейти от режима «как есть» к иным режимам электрического нагружения (в приближении малых амплитуд) можно с помощью простых линейных преобразований

$$\begin{aligned} U_{in} &= U_{in00}; \quad U_{pe} = U_{in00}U_{pe0}/U_{in0}; \quad U_R = U_{in00}U_{R0}/U_{in0}; \\ U_R &= U_{R00}; \quad U_{in} = U_{R00}U_{in0}/U_{R0}; \quad U_{pe} = U_{R00}U_{pe0}/U_{R0}; \\ U_{pe} &= U_{pe00}; \quad U_{in} = U_{pe00}U_{in0}/U_{pe0}; \quad U_R = U_{pe00}U_{R0}/U_{pe0}; \\ P_0 &= P_{00}; \quad t = [P_0/(U_{R0}U_{pe0})]^{1/2}; \quad U_{pe} = U_{pe0}t; \quad U_R = U_{R0}t; \quad U_{in} = U_{in0}t; \\ P_{in0} &= P_{in00}; \quad t_{in} = [P_{in0}/(U_{R0}U_{pe0})]^{1/2}; \quad U_{pe} = U_{pe0}t_{in}; \quad U_R = U_{R0}t_{in}; \quad U_{in} = U_{in0}t_{in}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь:  $U_{in00}$ ,  $U_{pe00}$ ,  $U_{R00}$ ,  $P_{00}$  и  $P_{in00}$  – заданные амплитудные значения, тогда как  $U_{in0}$ ,  $U_{pe0}$ ,  $U_{R0}$  – измеренные в режиме «как есть» величины.

АЧХ падений потенциала, построенные с применением формул (6), показывают, какими должны быть величины  $U_{in}$ ,  $U_{pe}$ ,  $U_R$  на тех или иных частотах, чтобы обеспечить заданный режим электрического нагружения. Что относится к АЧХ полной проводимости, фазовых сдвигов и мгновенной мощности, то они позволяют оценивать влияние различных факторов на характеристики колебаний пьезорезонаторов.

Экспериментальные исследования были проведены с тонким диском 66, 4 мм диаметром при толщине 3,1 мм из пьезокерамики ЦТБС-3. В начале мостом переменного тока Е8-12 измерялись межэлектродная емкость и диэлектрические потери. Затем в усовершенствованной схеме Мэсона были определены характеристические частоты и адмиттансы, строились АЧХ и ФЧХ. Частота генератора ГЗ-56/1, включенного на выходное сопротивление 50 Ом, контролировалась цифровым частотомером ЧЗ-38. Падения потенциала измерялись милливольтметром ВЗ-38 или цифровым мультиметром В2 – 27А/1. Согласующий делитель потенциала состоял из двух резисторов 68 и 10 Ом.

Диск имел собственную статическую емкость  $C_0 = 18,5$  нФ, тангенс диэлектрических потерь  $e_{33m} = 0,0085$ ; тангенс механических потерь  $s_{11m} = 0,0069$ ; коэффициент Пуассона  $n = 0,35$ ; планарный КЭМС  $k_{po}^2 = 0,31$  и тангенс пьезоэлектрических потерь  $d_{31m} = 0,0076$ . Нагрузочный резистор возле резонанса был 11,2 Ом, вблизи антирезо-

нанса – 20,1 кОм. Получено: частота максимума полной проводимости  $f_m = 31551$  Гц, максимум полной проводимости  $Y_m = 127,1$  мС, проводимость на уровне –3дБ  $Y_{-3db} = 89,87 \cong 90$  мС, разность частот на пределах полосы пропускания  $f_2 - f_1 = 22 / 28 \cdot 300 = 235,7$  Гц; добротность на резонансе  $Q_r = 31551 / 235,7 = 138,8$ ; частота максимума импеданса  $f_{нз} = 36499$  Гц, максимум импеданса  $Z_n = 16,86$  кОм, импеданс на уровне –3 дБ  $Z_{-3db} = 11,92$  кОм; разность частот на пределах полосы пропускания  $f_2 - f_1 = 31 / 33 \cdot 200 = 187,9$  Гц; добротность на антирезонансе  $Q_a = 36499 / 187,9 = 194,2$ .

Как известно, колебательную систему пьезоэлектрического резонатора можно представить в виде электрической схемы [8, 20, 21], в которой параллельно к статической межэлектродной емкости  $C_0$  присоединена последовательная ветвь, состоящая из индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и резистора  $r$  (этот резистор символизирует потери энергии). В радиотехнике такая система называется контуром третьего вида [6]. Резонанс напряжений в последовательной ветви  $L$ ,  $C$  и  $r$  соответствует резонансной частоте, когда  $r = 1/Y_m$ . Резонанс токов в параллельной цепи соответствует антирезонансной частоте. Эта цепь состоит из той же индуктивности  $L$  и эквивалентной емкости  $C'$ , образованной последовательно соединенными конденсаторами  $C_0$  и  $C$ , так что  $C' = C_0 C / (C_0 + C)$ .

В радиотехнике добротность  $Q$  резонансной системы определяется как отношение запасенной в цепи энергии  $E_{stor}$  к энергии потерь  $E_{dis.av}$ , которая рассеивается в течение периода колебаний. Она выражается через параметры цепи следующим образом [5, 6]:

$$Q = 2\pi \frac{E_{stor}}{E_{dis.av}} = \frac{\rho}{r} = \frac{2\pi f_0 L}{r} = \frac{1}{2\pi f_0 C r}; \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – волновое сопротивление;  $r$  – резистор потерь;  $f_0$  – резонансная частота;  $L$  и  $C$  – индуктивность и емкость цепи.

Для вычисления эквивалентных емкости и индуктивности можно получить следующие простые формулы:

$$C = \frac{1}{\rho\omega} = \frac{1}{2\pi f_0 \rho} = \frac{1}{2\pi f_0 Q_r r}; \quad L = \frac{\rho}{\omega} = \frac{\rho}{2\pi f_0} = \frac{Q_r r}{2\pi f_0}. \quad (8)$$

В диске 66,4·3,1 мм, нагруженном на 11,2 Ом, резистор потерь был равен  $r = 7,87$  Ом,  $Q_r = 138,8$  и  $\rho = Q_r \cdot r = 1092$  Ом,  $f_0 = 3,155 \cdot 10^4$  Гц,  $C_0 = 1,849 \cdot 10^{-8}$  Ф. Подставляя эти данные в формулу (8), получаем  $C = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 1,092 \cdot 3,155 \cdot 10^7) \Phi = 1 / (2,164 \cdot 10^8) \Phi = 4,62 \cdot 10^{-9} \Phi$ ,  $L = 1092 / (2 \cdot 3,14 \cdot 3,155 \cdot 10^4) \text{ Гн} = 5,51 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ . Емкость параллельной цепи  $C' = C \cdot C_0 / (C + C_0) = 4,62 \cdot 18,49 / (4,62 + 18,49) \cdot 10^{-9} \Phi = 3,696 \cdot 10^{-9} \Phi$ .

Частота параллельного резонанса (антирезонанса), волновое сопротивление и добротность на антирезонансе, соответственно, равны:  $f_n = 3,528 \cdot 10^4$  Гц,  $\rho = 1221$  Ом,  $Q_a = 1221 / 7,87 = 155,1$ .

При моделировании колебаний диска эквивалентной схемой, составленной из пассивных элементов  $L = 4$  мГн,  $C = 6,719$  нФ и  $C_0 = 25,22$  нФ, частота максимальной проводимости  $f_m = 30805$  Гц, максимум полной проводимости  $Y_m = 95,6$  мС, частота максимума импеданса  $f_{нз} = 34734$  Гц, максимум импеданса  $Z_n = 2,6$  кОм. Эти параметры близки к параметрам реального диска, за исключением максимума импеданса.

Расхождение может быть следствием шунтирующего действия выходного резистора согласующего делителя потенциала.

## 2. Влияние режима электрического нагружения на характеристики колебаний пьезокерамического диска.

Рис. 1 демонстрирует АЧХ полной проводимости (а), рассчитанной по формулам (1) – (3) (соответственно, сплошная, пунктирная и штриховая кривые), и фазовые сдвиги (б), как арккосинусы формул (4). Ни проводимость, ни углы не зависят от режима нагружения и представлены здесь в качестве примера. Угол  $\alpha$  (пунктир) образован сторонами  $U_R$  и  $U_{pe}$ . Он характеризует сдвиг фаз между током и падением потенциала на пьезоэлементе. Угол  $\beta$  (разрывные кривые) образован сторонами  $U_{in}$  и  $U_R$  и соответствует фазовому сдвигу между выходным электрическим напряжением генератора и потребляемым током. Угол  $\gamma$  (сплошные линии) образован сторонами  $U_{in}$  и  $U_{pe}$ , т.е. между выходным электрическим напряжением генератора и падением потенциала на пьезоэлементе.

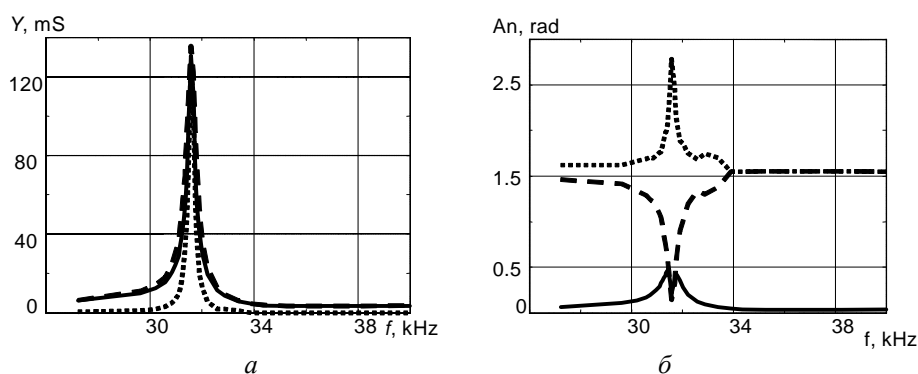


Рис. 1

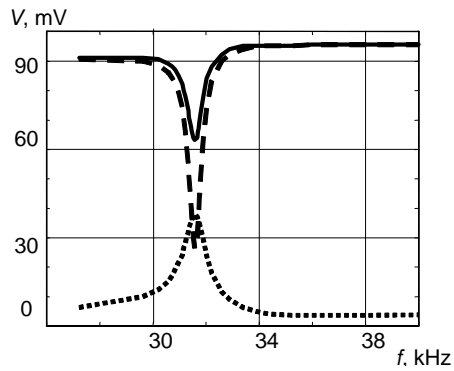
При переходе от режима «как есть» к другим режимам электрического нагружения с применением формул (6) сильно изменяются АЧХ падений потенциала (рис. 2) и мгновенных мощностей (рис. 3). Графики этих рисунков построены для режимов «как есть» (а), заданного тока (б), заданного падения потенциала на образце (в) или на входе (з), заданной мощности на образце (д) или на входе (е).

Падения потенциала  $U_{in}$  изображены сплошными линиями, и  $U_{pe}$  – штриховыми,  $U_R$  – пунктиром. Аналогично построены кривые рис. 3. Входная мощность  $P_{in}$  изображена сплошными линиями, мощность на образце  $P_{pe}$  – штриховыми, мощность на нагрузочном резисторе  $P_R$  – пунктиром, а сумма  $P_{pe} + P_R$  – штрих-пунктиром.

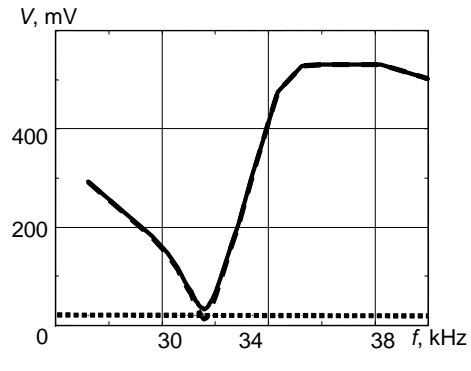
Графики рис. 1 – 3 построены для первой моды радиальных колебаний упомянутого выше диска из керамики ЦТБС-3 с размерами  $66,4 \times 3,1$  мм, нагруженного на 11,2 Ом.

Кривые построены для режима «как есть», тока заданной величины  $I_{pe} = U_R / R = 20 \text{ мВ} / 11,2 \text{ Ом} = 1,78 \text{ мА}$ , постоянного по амплитуде падения потенциала  $U_{pe} = 280 \text{ мВ}$ , постоянного по амплитуде входного напряжения  $U_{in} = 280 \text{ мВ}$  и постоянной мгновенной мощности  $p_{00} = 0,04 \text{ Вт}$ . Нетрудно видеть, что в режиме «как есть» падение потенциала  $U_R$  достигает максимума, а напряжения на входе измерительной части  $U_{in}$  и на пьезоэлементе  $U_{pe}$  проходят через минимумы. Чтобы обеспечить режим заданного тока, необходимо повышать входное напряжение  $U_{in}$  и напряжение на пьезо-

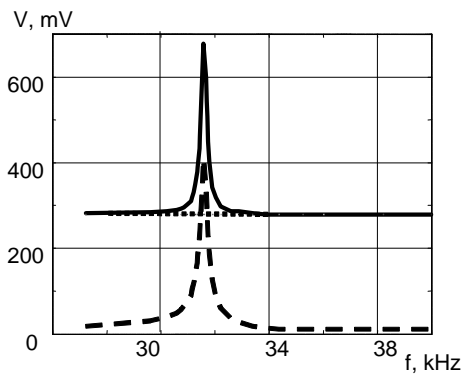
элементе  $U_{pe}$  вне резонанса. Наоборот, режим заданного напряжения на пьезоэлементе требует повышения напряжения на входе и сопровождается возрастанием на резонансе падения напряжения на нагрузочном резисторе. В случае заданного входного напряжения приближение к резонансу сопровождается резким снижением падения потенциала на пьезоэлементе  $U_{pe}$  и возрастанием падения потенциала  $U_R$ . Обеспечить режим заданной мгновенной мощности на образце или на входе можно при изменении входной разности потенциалов по довольно сложным кривым (рис. 2, *д*, *е*).



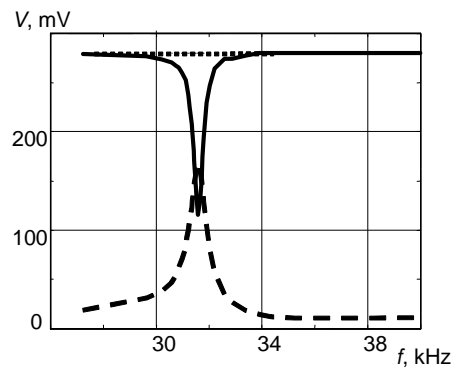
*a*



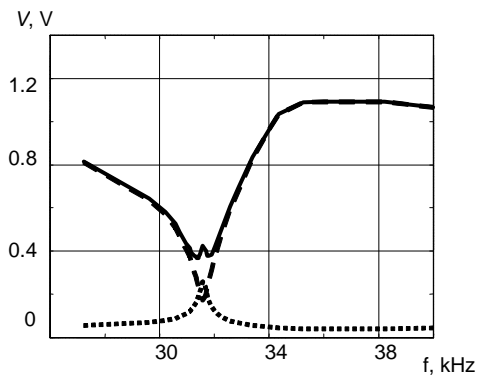
*б*



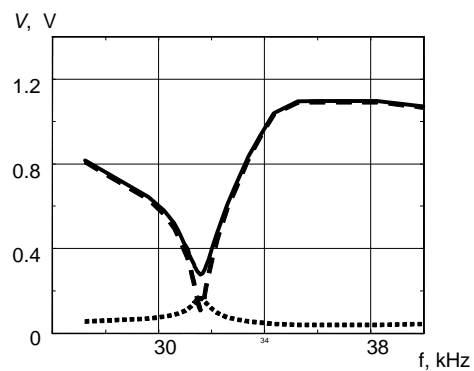
*в*



*г*



*д*



*е*

Рис. 2

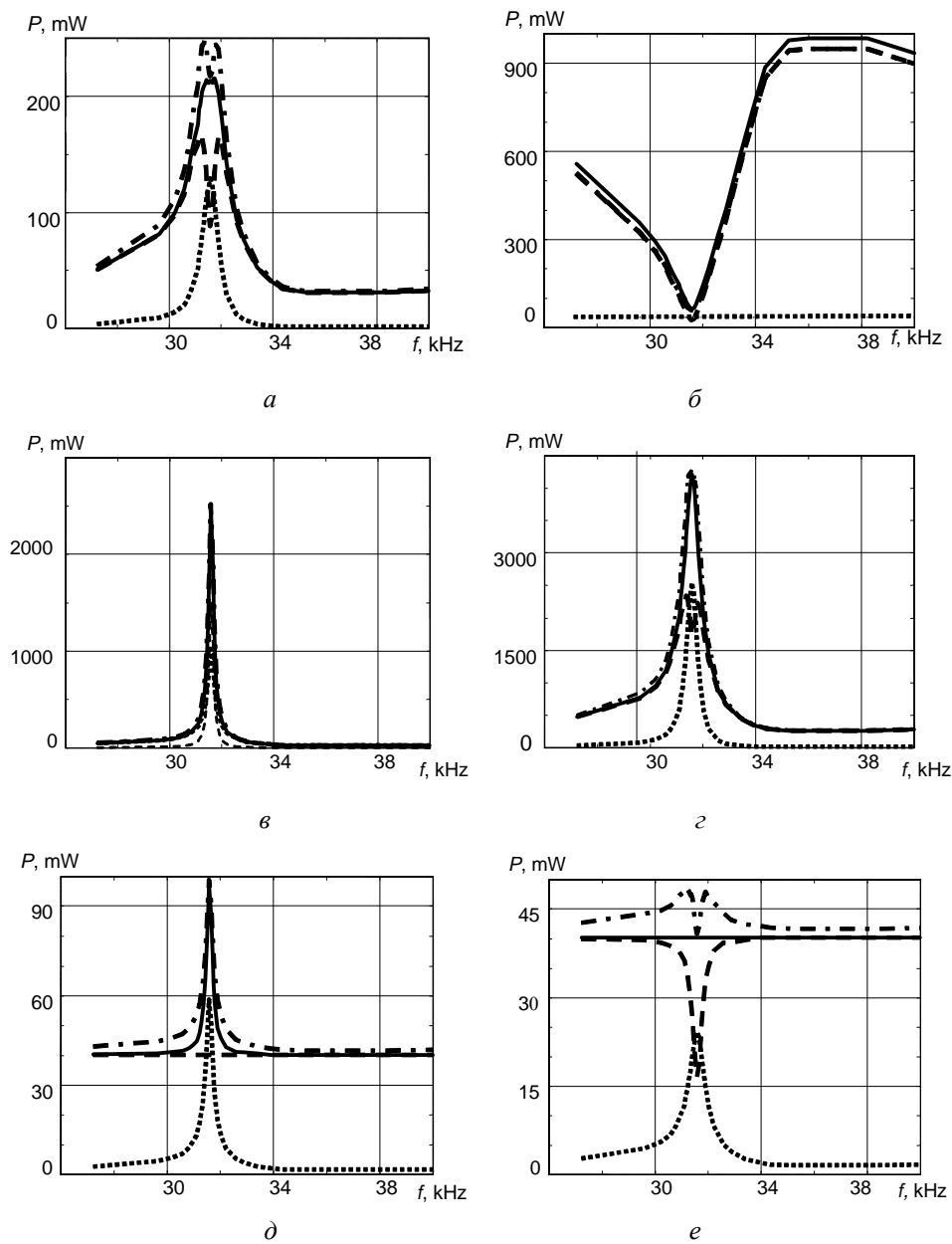


Рис. 3

Входная мгновенная мощность совпадает с суммой мгновенных мощностей на пьезоэлементе и его нагрузочном резисторе только на резонансе. Вне резонанса такого совпадения нет из-за фазовых сдвигов между падениями потенциала.

### 3. Зависимость характеристик электрической эквивалентной схемы от условий нагружения.

Радиальные колебания тонкого пьезокерамического диска, как уже отмечалось, моделировались эквивалентной электрической схемой типа Ван Дайка [8, 20, 21], составленной из пассивных элементов  $L = 4$  мГн,  $C = 6,719$  нФ и  $C_0 = 25,22$  нФ. Применялись термостабильные конденсаторы со слюдяным диэлектриком и малыми потерями. Катушка индуктивности была намотана в два провода диаметром 0,51 мм, ее

собственное сопротивление постоянному току равнялось 6,7 Ом. Эти пассивные элементы подобраны таким образом, что их величины и характеристические частоты близки к соответствующим параметрам реального диска. Эквивалентная схема присоединялась к усовершенствованному четырехполюснику Мэсона [1, 8, 12, 18, 24] вместо пьезоэлемента.

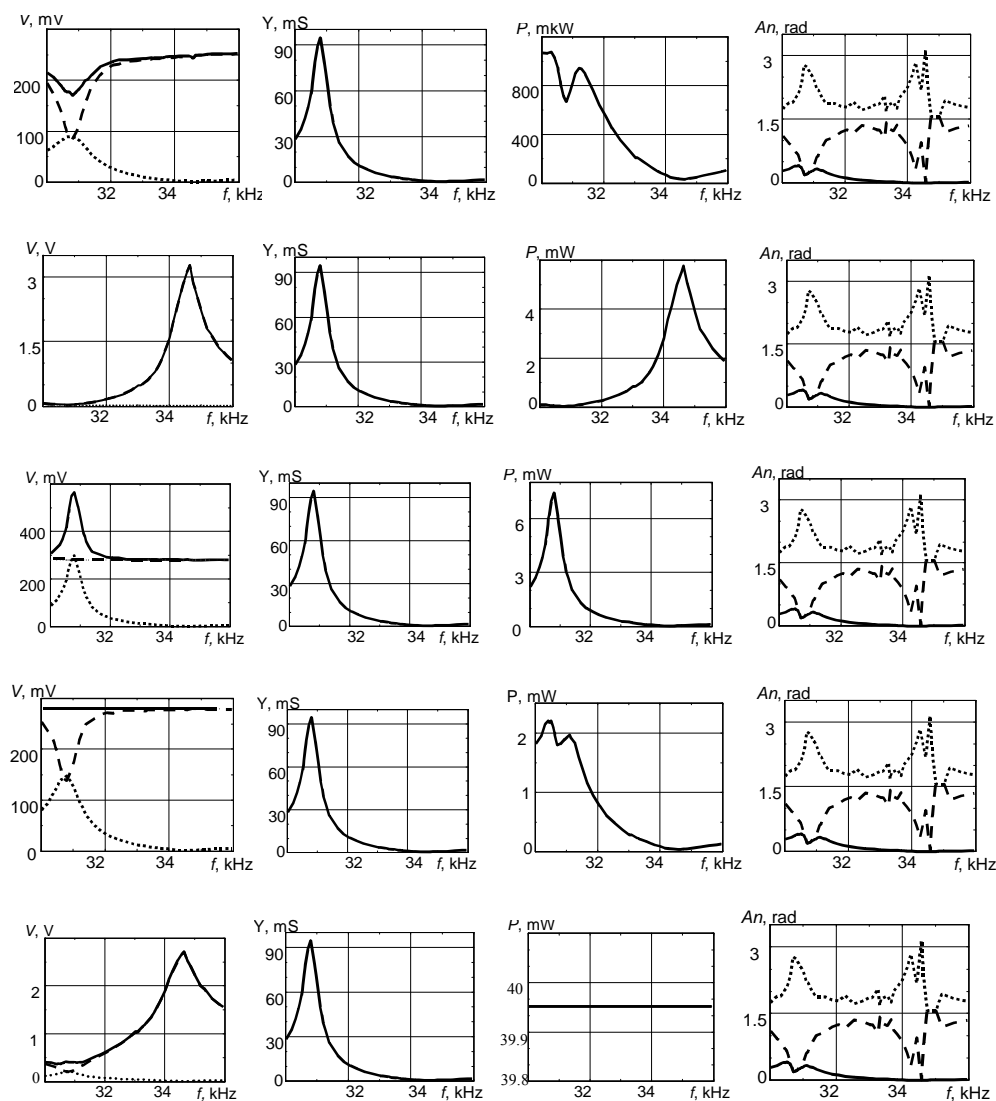


Рис. 4

Рис. 4 иллюстрирует результаты моделирования при нагрузочном резисторе 11,2 Ом. Построены графики падений потенциала (первый столбик), входного адмиттанса (второй столбик), мгновенной мощности пьезоэлемента (третий столбик), углов характеристического треугольника (четвертый столбик). Кривые построены для режима «как есть» (первый ряд), тока заданной величины  $I_{eq} = U_R / R = 20 \text{ мВ} / 11,2 \text{ Ом} = 1,78 \text{ мА}$  (второй ряд), постоянного по амплитуде падения потенциала  $U_{eq} = 280 \text{ мВ}$  (третий ряд), постоянного по амплитуде входного напряжения  $U_{in} = 280 \text{ мВ}$  (четвертый ряд) и постоянной мгновенной мощности  $p_{00} = 0,04 \text{ Вт}$ . Кривые АЧХ для режимов



заданных тока, напряжений и мощности пересчитаны по формулам (6), в которых вместо напряжения на образце  $U_{pe}$  подставлено напряжение на эквивалентной схеме  $U_{eq}$ .

На графиках падения потенциала  $U_{eq}$  изображены прерывистыми кривыми,  $U_{in}$  – сплошными линиями и  $U_R$  – пунктиром. Адмиттансы рассчитаны по формуле (1). Угол  $\alpha$  (пунктир) образован сторонами  $U_R$  и  $U_{eq}$ . Он характеризует сдвиг фаз между током цепи и падением потенциала на ней. Угол  $\beta$  (разрывные кривые) образован сторонами  $U_{in}$  и  $U_R$  и соответствует фазовому сдвигу между выходным электрическим напряжением генератора и потребляемым током. Угол  $\gamma$  (сплошные линии) образован сторонами  $U_{in}$  и  $U_{eq}$ , т.е. между выходным электрическим напряжением генератора и падением потенциала на эквивалентной цепи.

В общем, графики рис. 4 подобны соответствующим кривым реального диска (рис. 1 – 3). В режиме заданного тока падение потенциала на резонансе меньше, а в режиме заданного напряжения больше, чем при удалении от него. В режиме заданного тока мгновенная мощность снижается, а в режиме заданного напряжения увеличивается по сравнению с нерезонансными частотами. На антирезонансе все происходит наоборот – мгновенная мощность увеличивается при заданном токе и снижается при заданном напряжении. Этот результат в какой-то мере объясняет приведенные в работе [27] графики. Адмиттанс и фазовые сдвиги между сторонами характеристического треугольника не зависят от условий электрического нагружения – в линейном приближении соотношения между падениями потенциала  $U_{eq}$ ,  $U_{in}$  и  $U_R$  сохраняются. Напряжения  $U_{eq}$ ,  $U_{in}$  и  $U_R$ , их величины, равно как и их произведения, которым пропорциональны мгновенные мощности (5), сильно зависят от режима нагружения.

В режиме заданного тока АЧХ мгновенной мощности резонатора совпадает по форме с АЧХ входного напряжения и импеданса, а в режиме заданного напряжения на резонаторе АЧХ его мгновенной мощности совпадает по форме с АЧХ тока и адмиттанса.

Следует отметить, что выбранные для пересчетов заданные величины напряжений, тока и мощностей произвольны. По этой причине полученные цифры служат лишь для ориентации в тенденциях и не могут нести количественной информации. Тем не менее, приведенные на графиках величины напряжений показывают, как следует их изменять, чтобы обеспечить в эксперименте тот или иной режим нагружения.

Кроме приведенных в статье АЧХ падений потенциала, адмиттансов, мощностей и фазовых углов, на основе измеренных с применением схемы усовершенствованного четырехполюсника Мэсона падений потенциала  $U_{pe}(U_{eq})$ ,  $U_{in}$  и  $U_R$  можно построить также несколько других зависимостей, включая АЧХ тока, импеданса, активных и реактивных компонент полной проводимости, мгновенной мощности и импеданса.

### **Заключение.**

Проведены экспериментальные исследования в режиме «как есть» колебательных характеристик тонкого пьезокерамического диска в окрестности его первого радиального резонанса. Параллельно изучено поведение эквивалентной электрической схемы типа Ван Дайка, состоящей из пассивных  $R$ ,  $C$ ,  $L$  элементов. Посредством пересчета полученных данных построены АЧХ падений потенциала, адмиттансов, фазовых сдвигов и мгновенных мощностей для нескольких режимов электрического нагружения.

На основе исследования можно сделать такие выводы.

1. Поведение пьезопреобразователей сильно зависит от режима электрического нагружения и отличается для: 1) – заданных падений напряжения на пьезоэлементе или на входе; 2) – заданного тока; 3) – постоянной входной мощности или мгновенной мощности на пьезоэлементе.

2. От условий нагружения сильно зависят падения потенциала, входная мощность и мощность, которая выделяется на пьезоэлементе, тогда как адмиттанс, импеданс и фазовые сдвиги между компонентами полной проводимости такой зависимости не

проявляют. В режиме заданного тока приближение к резонансу сопровождается снижением мгновенной мощности, а приближение к антирезонансу ведет к ее увеличению. В режиме заданного падения потенциала все происходит наоборот – приближение к резонансу сопровождается увеличением мгновенной мощности, а приближение к антирезонансу ведет к ее снижению.

3. Невозможность экспериментального изучения колебаний пьезоэлектрических элементов без нагрузочных резисторов [3, 8, 11, 24] приводит к тому, что фазовые сдвиги в характеристическом треугольнике в значительной степени зависят от величины сопротивления этих резисторов. Тем не менее, на резонансных и антирезонансных частотах, где фазовых сдвигов между падением потенциала и током в пьезоэлементе нет, влиянием сопротивления нагрузочных резисторов можно пренебречь.

4. Моделирование колебаний пьезоэлектрических элементов известными  $R, C, L$  элементами дает возможность изучать их влияние на частоты резонанс / антирезонанс и на другие параметры.

5. Аналогичные результаты получены автором также при изучении влияния режима нагружения на электроупругие колебания тонких узких стержней, прямоугольных пластин, круговых и цилиндрических колец, коротких и длинных цилиндрических оболочек и т. д. Во всех случаях оказалось, что адмиттанс, импеданс и фазовые углы не зависят от условий нагружения. Эти условия сильно влияют лишь на падения потенциала, на протекающие в пьезоэлементе токи и на мощности. На обертонах колебаний картина усложняется возросшим влиянием межэлектродной емкости. Этот вопрос, однако, требует отдельного исследования.

**РЕЗЮМЕ.** Дано аналіз експериментальних даних для основної радіальної моди тонкого п'єзокерамічного диска. Встановлено, що спади напруг і миттєві потужності дуже чутливі до умов навантаження, а адмітанси, імпеданси і фазові зсуви не залежать від них. В режимі заданого струму наближення до резонансу супроводжується зниженням миттєвої потужності, тоді як наближення до антирезонансу – її підвищенням. В режимі заданої напруги наближення до резонансу супроводжується підвищенням миттєвої потужності, тоді як наближення до антирезонансу – її зниженням.

1. *Безверхий О., Зінчук Л., Карлаш В.* Вплив режиму електричного навантаження, сталих напруги або струму на характеристики коливань п'єзокерамічних резонаторів // Фіз.-матем. моделювання та інформ. технології. – 2013. вип. 18. – С. 9 – 20.
2. *Безверхий О., Зінчук Л., Карлаш В.* Повна провідність і миттєва потужність під час вимушених коливань п'єзокерамічних резонаторів // Фіз.-матем. моделювання та інформ. Технології. – 2014, вип. 20. – С. 27 – 35.
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. *Жеребцов И.П.* Радиотехника. – М.: Связь – Сов. радио, 1965. – 656 с.
6. *Калашиников А.М., Степук Я.В.* Основы радиотехники и радиолокации. – М.: Воениздат., 1962. – 368 с.
7. *Карлаш В.Л.* Диссипация энергии при колебаниях тонких пьезокерамических круглых пластин // Прикл. механика. – 1984. – 20, № 5. – С. 77 – 82.
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.1. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 416 с.
10. *Шульга Н.А., Болкисев А.М.* Колебания пьезоэлектрических тел. – К.: Наук. думка, 1990. – 228 с.
11. *Шульга М.О., Карлаш В.Л.* Резонансні електромеханічні коливання п'єзоелектричних пластин. – К.: Наук. думка, 2008. – 272 с.
12. *Шульга М.О., Карлаш В.Л.* Вимірювання повної провідності п'єзокерамічних елементів у схемі чотириполосника Мезона та її варіантах // Тези ІУ Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2008». – Черкаси – Гурзуф, 2008. – С. 54 – 56.
13. *Шульга М.О., Карлаш В.Л.* Амплітудно-фазові характеристики радіальних коливань тонкого п'єзокерамічного диска біля резонансів // Доп. НАН України. – 2013. – № 9. – С. 80 – 86.
14. *Яффе Б., Кук У., Яффе Г.* Пьезоэлектрическая керамика. – М.: Мир, 1974. – 288 с.

15. *Holland R.* Representation of dielectric, elastic and piezoelectric losses by complex coefficients // IEEE Trans. SU. – 1967. – SU-14, – P. 18 – 20.
16. *IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics.* 1961 // Proc. IRE. – 1961. – **49**. – P. 1161 – 1169.
17. *Karlash V. L.* Resonant electromechanical vibrations of piezoelectric plates // Int. Appl. Mech. – 2005. – **41**, N 7. – P. 709 – 747.
18. *Karlash V. L.* Particularities of amplitude-frequency characteristics of admittance of thin piezoceramic half-disk // Int. Appl. Mech. – 2009. – **45**, N 10. – P. 647 – 653.
19. *Karlash V.L.* Forced electromechanical vibrations of rectangular piezoceramic bars with sectionalized electrodes // Int. Appl. Mech. – 2013. – **49**, N 3. – P. 360 – 368.
20. *Karlash V.L.* Energy losses in piezoceramic resonators and its influence on vibrations' characteristics // Electronics and communication. – 2014. – **19**, N 2 (79). – P. 82 – 94.
21. *Karlash V.L.* Modelling of energy-loss piezoceramic resonators by electric equivalent networks with passive elements // Mathematical modelling and computing. – 2014. – **1**, № 2. – P. 163 – 177.
22. *Mezheritsky A.V.* Elastic, dielectric and piezoelectric losses in piezoceramics; how it works all together // IEEE Trans UFFC. – 2004. – **51**, N 6. – P. 695 – 797.
23. *Munk E.C.* The equivalent electrical circuit for radial modes of a piezoelectric ceramic disk with concentric electrodes // Phillips Res. Rep. – 1965. – **20**. – P. 170 – 189.
24. *Shul'ga N.A., Karlash V.L.* Measuring the Amplitudes and Phases of Vibrations of Piezoceramic Structural Elements // Int. Appl. Mech. – 2015. – **51**, N 3. – P. 350 – 359.
25. *Uchino K., Zheng J. H., Chen Y. H. et al.* Loss mechanisms and high power piezoelectrics // J. Mat. Sci. – 2006. – **41**, P. 217 – 228.
26. *Uchino K., Zhuang Yu. and 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.
27. *Ural S.O., Tuncdemir 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 11. 06. 2015

Утверждена в печать 29.11.2016

