

АКУСТООПТИКА

УДК 535.241.13:534

ШИРОКОПОЛОСНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ТРАКТОМ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В. Я. Молчанов¹, О. Ю. Макаров¹, Д. В. Друина², О. В. Гасанов²

¹ НТЦ Акустооптики НИТУ «МИСиС»

² Тверской государственный университет

Предложен метод синтеза согласующих цепей пьезопреобразователей для акустооптических устройств. Алгоритмы расчета согласующих LC элементов основаны на учёте физических особенностей диаграммы полных импедансов и проводимостей Смита без применения стандартных методов теории фильтров СВЧ. Осуществлена компьютерная симуляция работы векторных анализаторов цепей. Метод позволяет легко предсказать влияние на граничные частоты диапазона согласования подключения новых дополнительных реактивных элементов. Достоинством предложенного феноменологического подхода является его наглядность и пригодность для практического осуществления.

Ключевые слова: *акустооптические устройства, пьезопреобразователи, акустическое согласование, электрическое согласование, диаграмма Смита*

1. Введение. Важнейшей характеристикой любого акустооптического устройства является его широкополосность. Так, полоса рабочих частот дефлектора определяет число разрешимых позиций, полоса рабочих частот модулятора – его быстродействие, в анализаторе спектра радиосигналов полоса определяет диапазон обработки радиосигналов, в акустооптических фильтрах и дисперсионных линиях задержки полоса рабочих частот пьезопреобразователя определяет оптический спектральный диапазон прибора.

Входной электрический импеданс пьезопреобразователя представляет собой сложную частотнозависимую комплексную функцию. Как правило, пьезопреобразователи эффективно возбуждают звук лишь в некоторой полосе вблизи частоты собственного резонанса. Задачей электрического согласования является расширение полосы звуковых частот, эффективно передаваемых в кристалл, и уменьшение отражений электрического сигнала от радиочастотного входа прибора в тракте АО прибор – генератор. Эта задача решается благодаря

включению между пьезопреобразователем и генератором специально синтезированного четырехполюсника, называемого согласующей системой и осуществляющего трансформацию комплексного импеданса пьезопреобразователя в область активного сопротивления 50 Ом с заданным уровнем коэффициента стоячей волны (КСВ.)

Полная эквивалентная схема односторонне нагруженного пьезопреобразователя была создана в классическом труде Мэзона [1] и модифицирована в работе [2]. В работе [3] на основе анализа схемы Мэзона получено строгое аналитическое выражение для комплексного электрического импеданса пьезопреобразователя с учетом параметров промежуточного связующего слоя и без каких-либо математических упрощений и физических ограничений.

Основным аспектом настоящего исследования является создание метода синтеза согласующих цепей на основе формализма диаграмм Смита [4] и математического алгоритма расчета конкретных значений согласующих LC-элементов от элементарных до сложных многосвязных. При этом используются строгие формулы для комплексного импеданса пьезопреобразователя. До опубликования работы [3] при синтезе схем согласования и расчете их элементов весьма распространенными были стандартные методы теории фильтров СВЧ. Для этих работ было характерно использование классической процедуры, принятой в радиотехнике в теории цепей СВЧ: расчет низкочастотного фильтра (фильтра – прототипа), переход от параметров фильтра – прототипа к параметрам полоснопропускающего фильтра, расчет элементов согласующей цепи для достижения заданной характеристики пропускания фильтра (баттервортовской или чебышевской) и т.д. [5]. При этом использовались упрощенные варианты эквивалентной схемы пьезопреобразователя.

В настоящем исследовании при синтезе схем согласования и расчете их элементов не применяются стандартные методы теории фильтров СВЧ, а используются физические особенности диаграммы полных импедансов и проводимостей Смита. Достоинством предложенного феноменологического метода синтеза согласующих цепей по диаграмме Смита является его наглядность и пригодность для практического осуществления.

2. Алгоритм расчета параметров пьезопреобразователей акустооптических устройств. Входной электрический импеданс пьезопреобразователя акустооптического устройства определяется формулами, представляющими собой комплексную функцию частоты $Z_{in} = R(f) + jX(f)$. В работе [3] получено следующее выражение для входного электрического импеданса.

$$Z_{in} = R(f) + jX(f) = \frac{\rho_m V_m (A'D' + B'C')}{D'^2 + C'^2 \rho_m^2 V_m^2} - j \frac{A'C' \rho_m^2 V_m^2 - B'D'}{D'^2 + C'^2 \rho_m^2 V_m^2}, \quad (1)$$

где

$$A' = \frac{1}{\frac{\omega}{\omega_o} \rho_b V_b} \left[\rho_b V_b \cos \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \cos \pi \frac{\omega}{\omega_o} - \frac{k^2}{\pi} \sin \pi \frac{\omega}{\omega_o} \right) - \right. \\ \left. \rho_o V_o \sin \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \sin \pi \frac{\omega}{\omega_o} + \frac{2k^2}{\pi} \left(\cos \pi \frac{\omega}{\omega_o} - 1 \right) \right) \right]$$

$$B' = \frac{1}{\frac{\omega}{\omega_o}} \left[\rho_b V_b \sin \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \cos \pi \frac{\omega}{\omega_o} - \frac{k^2}{\pi} \sin \pi \frac{\omega}{\omega_o} \right) + \right. \\ \left. \rho_o V_o \cos \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \sin \pi \frac{\omega}{\omega_o} + \frac{2k^2}{\pi} \left(\cos \pi \frac{\omega}{\omega_o} - 1 \right) \right) \right]$$

$$C' = \frac{1}{\rho_b V_b} \frac{\omega}{\omega_o} \omega_o C_o \left[\rho_b V_b \cos \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\cos \pi \frac{\omega}{\omega_o} \right) - \right. \\ \left. \rho_o V_o \sin \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\sin \pi \frac{\omega}{\omega_o} \right) \right]$$

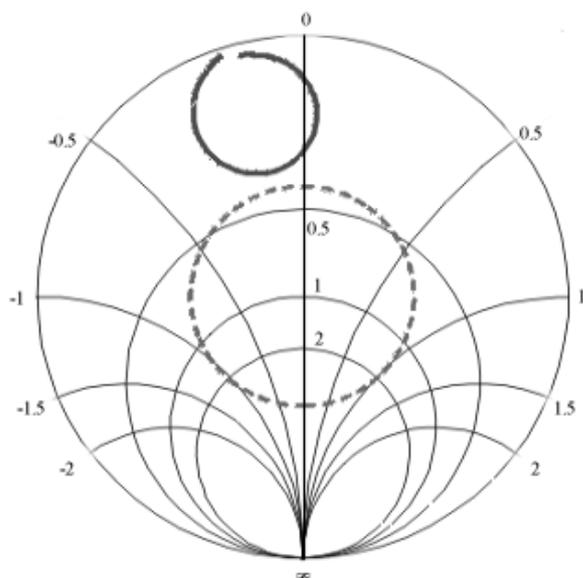
$$D' = -\frac{\omega}{\omega_o} \omega_o C_o \left[\rho_b V_b \cos \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\sin \pi \frac{\omega}{\omega_o} \right) + \right. \\ \left. \rho_o V_o \sin \pi \frac{\omega}{\omega_b} \left(\cos \pi \frac{\omega}{\omega_o} \right) \right]$$

Здесь и далее используются следующие обозначения: $Z_o = \rho_o V_o$, акустический импеданс пьезопреобразователя, ρ_o – плотность пьезопреобразователя, V_o – скорость звука в пьезопреобразователе, L_o – толщина пластинки пьезопреобразователя, S – площадь пьезопреобразователя (площадь звукового столба), k – коэффициент электромеханической связи материала пьезопреобразователя, $f_o = \frac{V_o}{2l_o}$ – частота антирезонанса, $Z_b = \rho_b V_b$ – акустический импеданс

промежуточного связующего слоя, ρ_b – плотность связующего слоя, V_b – скорость звука в связующем слое, l_b – толщина связующего слоя, $Z_m = \rho_m V_m$ – акустический импеданс акустооптической среды (подложки), ρ_m – плотность акустооптической среды, V_m – скорость звука в акустооптической среде, Z_s – выходной импеданс генератора, f – частота генератора, $C_o = \varepsilon \frac{S}{l_o}$ – статическая емкость пьезопреобразователя, Z_{in} – входной электрический импеданс пьезопреобразователя, нагруженного на акустооптическую среду через промежуточный связующий слой, ε – диэлектрическая постоянная материала пьезопреобразователя.

В большинстве практических случаев мнимая часть имеет, как правило, емкостной характер. В качестве примера рассмотрим практически важную комбинацию пьезопреобразователь – акустооптическая среда: ниобат лития LiNbO_3 X-среза, возбуждающего сдвиговую акустическую волну, и парателлурита TeO_2 . Предполагается, что геометрия акустооптического взаимодействия такова, что имеет место анизотропная дифракция на медленной сдвиговой акустической моде. В расчетах принято: $k = 0.68$, $\rho_0 = 4.64 \text{ г/см}^3$, $V_0 = 4.8 \cdot 10^5 \text{ см/с}$, $l_0 = 39 \text{ мкм}$, $C_0 = 318 \text{ пф}$, $\rho_m = 6.0 \text{ г/см}^3$, $l_b = 2 \text{ мкм}$, $\rho_b = 10 \text{ г/см}^3$, Сдвиговая скорость акустооптической среды $V_m = 0.875 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ рассчитана для случая, когда волновая нормаль акустической волны составляет угол 18° с осью [110] монокристалла TeO_2 .

На рис. 1 приведена частотная зависимость действительной и мнимой частей входного импеданса пьезопреобразователя в системе координат диаграммы полных импедансов Смита [4] с нормированными значениями сопротивлений к величине выходного сопротивления генератора $Z_s = 50 \text{ Ом}$. Вычисления входного импеданса сделаны с использованием уравнений (1). Диапазон частот электрических сигналов 30...70 МГц.



Р и с . 1. Входной импеданс пьезопреобразователя Z_{in} на диаграмме полных импедансов Смита. Здесь и далее пунктирная окружность соответствует значению КСВ = 2,5

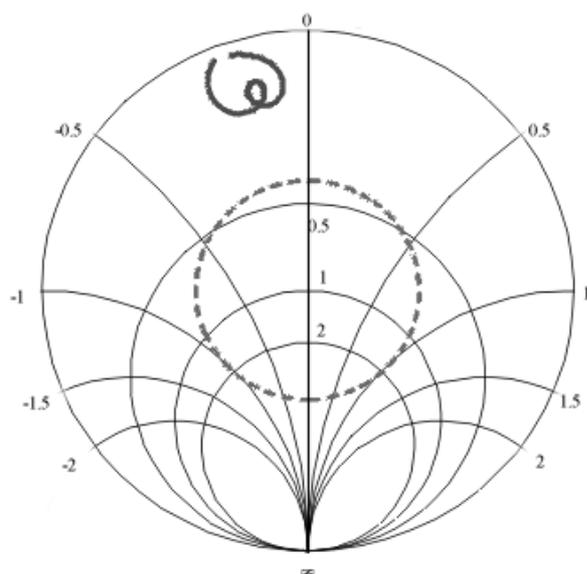
3. Влияние промежуточного связующего слоя. Влияние параметров промежуточного связующего слоя на частотную характеристику пьезопреобразователя является наименее исследованным эффектом в практике согласования. Этот эффект вносит существенные коррективы в полосу эффективно возбуждаемых частот ультразвука. Толщины связующего слоя могут достигать весьма высоких значений до 3...8 мкм в зависимости от числа слоев и применяемых материалов. Параметры материала связующего слоя также весьма существенны. Так, в монографии [6] отмечено, что замена индия в промежуточном слое на олово в акустооптическом фильтре на парателлурите с конструктивным углом падения 20° расширила спектральный диапазон прибора с 420...650 нм до 370...850 нм. По этой причине традиционные упрощенные схемы замещения пьезопреобразователя без учета промежуточного слоя для практики имеют ограниченное применение. Как отмечено выше, выражение (1) для комплексного импеданса пьезопреобразователя содержит параметры промежуточного слоя: ρ_b , V_b и l_b . Остальное же многообразие параметров пьезопреобразователя следует, в основном, рассматривать как заданное, т.к. они однозначно определяются оптическими параметрами создаваемого акустооптического устройства и корректировке не подлежат. Исключение составляет, пожалуй,

емкость пьезопреобразователя, которую при необходимости можно уменьшить его секционированием.

Наиболее сильно эффект влияния промежуточного слоя проявляется, если материалы пьезопреобразователя и акустическая среда имеют значительный разбаланс акустических импедансов: $\rho_o V_o \neq \rho_m V_m$. Классический пример такой пары – рассмотренные в предыдущем разделе *X*-срез ниобата лития LiNbO₃ и медленная сдвиговая ориентация монокристалла парателлурита TeO₂.

В теории и практике согласования при рассмотрении влияния параметров промежуточного слоя интерес представляют эффект четвертьволнового согласования толстыми промежуточными слоями и менее выраженный эффект изменения полосы рабочих частот пьезопреобразователя от изменения толщины ультратонкого связующего слоя.

Эффект четвертьволнового акустического согласования имеет место при выполнении условий $l_b = V_b / 4f$ и $\rho_b V_b = \sqrt{\rho_o V_o \rho_m V_m}$. Разумеется, четвертьволновое акустическое согласование строго выполняется на определенной частоте. Были произведены соответствующие расчеты входного импеданса пьезопреобразователя в системе координат диаграммы Смита (рис. 1) для случая, когда параметры промежуточного связующего слоя удовлетворяют условиям четвертьволнового согласования. В расчете использованы те же значения параметров, что и для предыдущего случая (рис. 1), за исключением параметров промежуточного слоя $l_b = 5$ мкм, $\rho_b = 10.8$ г/см³, $V_b = 1.0 \cdot 10^5$ см/с. Из рис. 2 следует, что, по сравнению с более тонким связующим слоем в предыдущем случае $l_b = 2$ мкм, четвертьволновый связующий слой приводит к расширению диапазона частот до 25...80 МГц (рис. 2) по сравнению с полосой 30...70 МГц на рис. 1 при одновременном уменьшении геометрических границ области эффективного возбуждения ультразвука. Последнее является важным обстоятельством, т.к. при электрическом согласовании импедансов дает возможность дополнительного расширения полосы рабочих частот пьезопреобразователя.



Р и с . 2. Теоретический расчет эффекта акустического четвертьволнового согласования

Эффект акустического согласования промежуточными слоями, элементарный с точки зрения теории, тем не менее является практически не проработанным экспериментально в литературе.

Если толщина напыляемых металлических слоев легко измеряется, то акустический импеданс такой слоистой структуры (например, Cr-Au-In-Au-Cr) контролировать затруднительно. Причина заключается в том, что, во-первых, плотность и скорость звука в тонких пленках отличается от их значений в объемном образце металла. Наиболее исчерпывающей здесь, по-видимому, является работа [7], авторы которой, проанализировав предшествующие источники и сделав собственные измерения, дают разброс акустических импедансов для тонких пленок In от 5,5 до $6,4 \cdot 10^5$ г/(см²с) и для Au от 23,2 до $28,8 \cdot 10^5$ г/(см²с).

Вторая причина заключается в высокой химической активности индия In по отношению к золоту Au. При вакуумном напылении пленок Au и In уже при комнатной температуре возникает сильная интердиффузия между атомами In и Au, которая приводит к образованию новых бинарных интерметаллических соединений [8, 9]. В тонких (0,1...1,0 мкм) пленках процесс образования интерметаллических соединений завершается при комнатной температуре в течение нескольких десятков минут. Какое именно соединение образуется – зависит от количественного соотношения чистого In и Au, участвующего в реакции, и определяется по диаграмме химического равновесия [8]. Акустические импедансы бинарных

интерметаллических соединений отличаются от импедансов исходных пленок In и Au, вступающих в реакцию. Данные в литературе по акустическим импедансам подобных соединений отсутствуют. Это обстоятельство значительно усложняет проведение технологического процесса, обеспечивающего конкретные параметры четвертьволнового промежуточного слоя для акустического согласования.

Необходимо обратить внимание также на следующие обстоятельства.

Характерные значения толщины промежуточных слоев для реализации четвертьволнового акустического согласования в акустооптике составляют 2...10 мкм. Из опыта микропленочной вакуумной технологии хорошо известно, что напыление столь толстых пленок вакуумными методами затруднено [10]. Такие пленки обладают значительными внутренними механическими напряжениями, резко понижающими их адгезию. Воспроизводимость технологических процессов в этом случае, а также процент выхода годных изделий уменьшается.

Получение толстых пленок в принципе возможно за счет распыления избыточного слоя индия, в котором негативное влияние внутренних напряжений проявляется существенно меньше, чем в золоте. Но при таком подходе значительно возрастают потери на преобразование электрической энергии в акустическую вследствие поглощения акустических волн в слое индия. Эффективность прибора уменьшается и возникает дополнительное тепловыделение в промежуточном связующем слое.

Существенной технической проблемой с толстыми слоями является задача электрического согласования. Известно, что для приборов с избыточным слоем индия характерны высокие потери акустической энергии в слое. В этом случае, при электрическом согласовании импедансов пьезопреобразователя, даже использование самой современной метрологической аппаратуры (такой как векторные анализаторы цепей Agilent) не дает возможности определить, какая часть акустической энергии прошла в кристалл, а какая часть поглотилась связующим слоем. Векторный анализатор регистрирует факт «откачки» электрической энергии. В результате акустооптический прибор может быть формально согласован с заданным КСВ в широком диапазоне частот, но не только на сопротивление излучения звука в кристалл, но и на сопротивление потерь.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование методов синтеза согласующих цепей акустооптических устройств. Согласование любой комплексной нагрузки в радиотехнике осуществляется недиссипативными элементами: последовательно-

параллельными LC-звеньями технически выполненными либо на сосредоточенных элементах (емкости и катушки индуктивности), либо на элементах с распределенными постоянными (резонаторы, трансформаторы, линии, полосковые структуры). Все случаи практического согласования импедансов в радиотехнике отличаются только конкретным видом частотной зависимости комплексного импеданса устройства, подлежащего согласованию в заданном диапазоне частот.

Диаграммы Смита широко используются в СВЧ-радиотехнике, начиная с конца 30-х годов прошлого века. Тем не менее, до выхода в свет публикации [3] в литературе не были описаны методы расчета согласующих элементов акустооптических устройств с использованием физических свойств диаграмм Смита. В редких диаграммы Смита использованы в иллюстративных целях [6]. В настоящем разделе описывается методика, позволяющая математическими методами на основе выражений (1) осуществить симуляцию конверсии комплексных импедансов под воздействием согласующих LC-цепей в цилиндрической системе координат диаграмм Смита. Эта методика является симуляцией работы типичного векторного анализатора цепей и позволяет для конкретного акустооптического устройства точно рассчитывать конкретные величины L и C элементов, образующих согласующие звенья. Это позволяет устранить излишний эмпиризм при подборе согласующих цепей при практическом согласовании акустооптических приборов.

В качестве примера рассмотрим импеданс пьезопреобразователя $Z_{in} = R + jX$ с промежуточным связующим слоем, графически изображенный на рис. 1 (этому случаю соответствуют следующие значения параметров: $\rho_b = 10 \text{ г/см}^3$, $V_m = 0.875 \cdot 10^5 \text{ см/с}$, $V_b = 1.0 \cdot 10^5 \text{ см/с}$). Если к импедансу Z_{in} подключить последовательно емкость C_1 , то изменится только мнимая его часть, действительная часть останется постоянной и новый импеданс Z_{in1} будет описываться выражением $Z_{in1} = R + j(X - \frac{1}{\omega C_1})$.

С точки зрения диаграммы Смита операция добавления последовательной емкости эквивалентна перемещению частотной области импедансов (на рис. 1 против часовой стрелки) так, что каждая активная координата области будет следовать по соответствующей окружности постоянных активных сопротивлений $R = \text{const}$. Новая область импедансов Z_{in1} займет место, показанное на рис. 3.

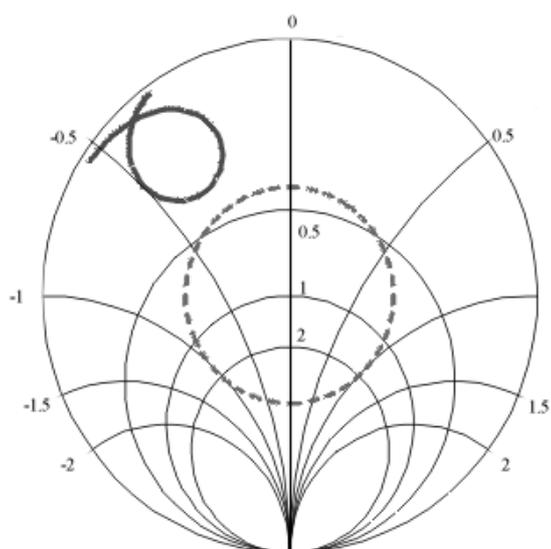


Рис. 3. Импеданс пьезопреобразователя с последовательной емкостью $C_1 = 250$ пФ на диаграмме полных импедансов Смита

Одно из свойств диаграммы Смита заключается в том, что переход от импедансов к проводимостям соответствует повороту каждой точки на диаграмме строго на 180° [4]. Тогда проводимость $\sigma_1 = 1/Z_{in1}$ пьезопреобразователя, соответствующая импедансу Z_{in1} на предыдущем рис. 3, на диаграмме полных проводимостей Смита займет область, изображенную на рис. 4. Справа от диаграммы Смита условно изображен первый элемент согласующей цепи – последовательная емкость с расчетным значением $C_1 = 250$ пФ.

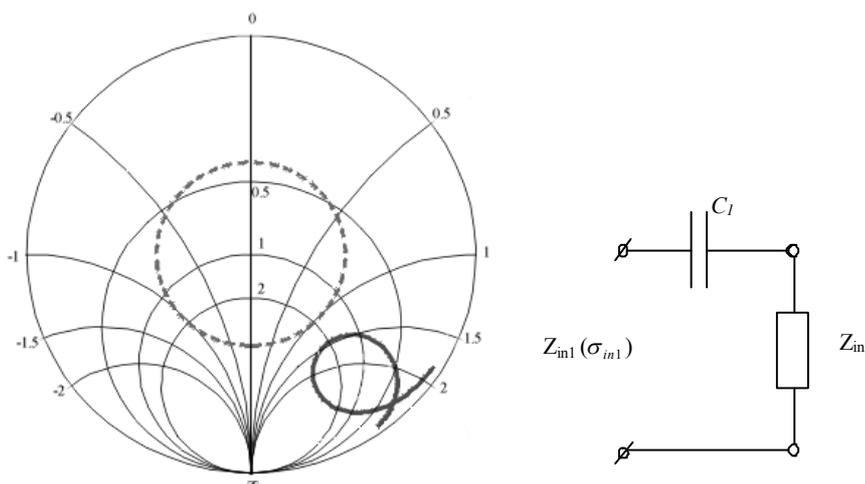


Рис. 4. Проводимость пьезопреобразователя с последовательной емкостью $C_1 = 250$ пФ на диаграмме полных проводимостей Смита

Выражение для проводимости σ_{in1} записывается в виде $\sigma_{in1} = \alpha + j\beta$, где α и β – действительная и мнимая части. Если к проводимости σ_{in1} подключить параллельную индуктивность L_1 , то изменится только ее мнимая часть, действительная часть будет оставаться постоянной, и новая проводимость σ_{in2} будет описываться выражением $\sigma_{in2} = \alpha + j(\beta - \frac{1}{\omega L})$.

С точки зрения диаграммы Смита это эквивалентно перемещению области эффективного излучения ультразвука против часовой стрелки (рис. 4), так что опять каждая действительная координата проводимости будет следовать по соответствующей окружности постоянных активных проводимостей $\sigma = \text{const}$. Если элементы L_1 и C_1 подобраны так, что область излучения пьезопреобразователя займет центральную позицию на диаграмме проводимостей Смита, целиком лежащую внутри окружности заданного КСВ, то можно говорить о том, что необходимое согласование с заданным КСВ достигнуто (см. рис. 5).

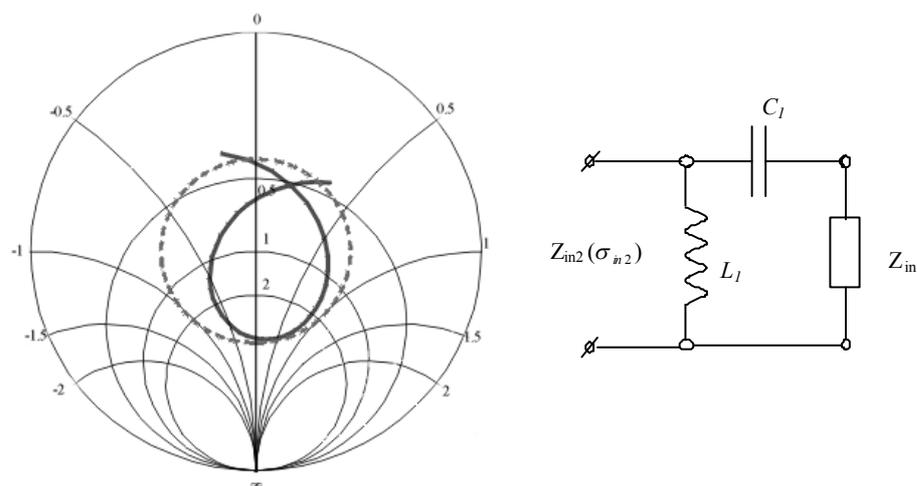


Рис. 5. Согласование импедансов Г-образной LC-цепью с помощью диаграммы полных проводимостей Смита. Рассчитанные значения $C_1 = 250$ пФ, $L_1 = 0.07$ мкГн, полоса 40...65 МГц

Легко видеть, что последовательная емкость C_1 осуществляет трансформацию активной составляющей проводимости пьезопреобразователя (подобный способ рассматривался, например, в работе [5], а параллельная индуктивность L_1 – частичную компенсацию реактивной компоненты проводимости пьезопреобразователя (см. например [11]).

Дальнейшее расширение полосы согласования может быть осуществлено последовательным подключением емкости и индуктивности на основании следующих физических соображений.

Включение последовательной емкости переводит по диаграмме проводимости Смита значение проводимости на очень малых частотах из точки ' ∞ ' в точку '0' против часовой стрелки (не оказывая влияния на высокочастотный участок проводимости).

Включение же последовательной индуктивности, не оказывая влияния на низкочастотную область проводимости, переведет значение проводимостей из точки ' ∞ ' в точку '0' в высокочастотной области проводимости по часовой стрелке (рис. 6, б). Результаты компьютерной симуляции показывают, что только последовательная емкость $C_2 = 36$ пФ или только последовательная индуктивность $L_2 = 0,26$ мкГн сильно деформируют область эффективного излучения ультразвука. Чтобы уменьшить эту деформацию, в исходные данные демонстрационной симуляции было введено дополнительное подключение малой индуктивности $L_2 = 0,1$ мкГн (рис. 6, а) и большой емкости $C_2 = 100$ пФ (рис. 6, б), соответственно.

Одновременное включение корректно подобранных последовательных емкости C_2 и индуктивности L_2 даст совокупный эффект (рис. 7) и трансформирует в центральную область диаграммы Смита с заданным КСВ большой частотный диапазон по сравнению с ранее достигнутым на рис. 5.

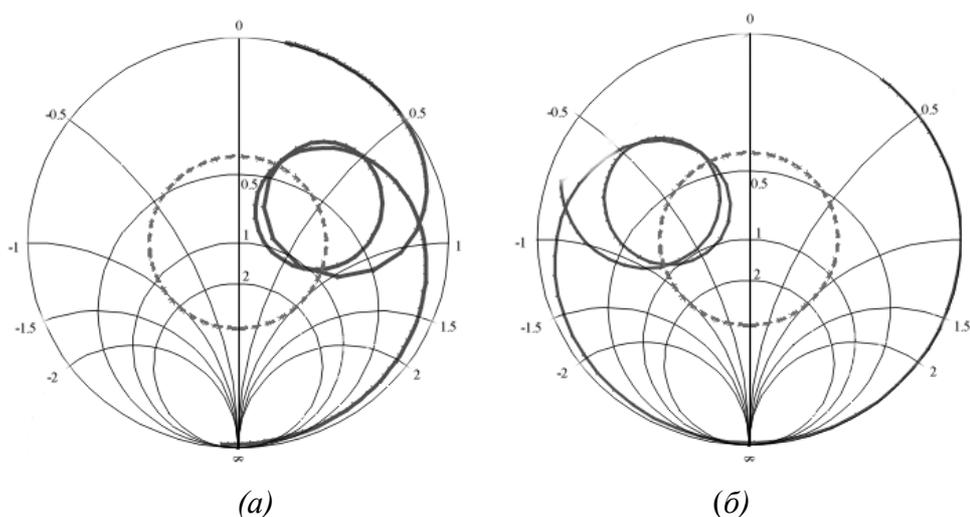


Рис. 6. Эффект независимого подключения последовательной емкости $C_2 = 36$ пФ и малой индуктивности $L_2 = 0,1$ мкГн (а) и последовательной индуктивности $L_2 = 0,26$ мкГн и большой емкости $C_2 = 100$ пФ (б)

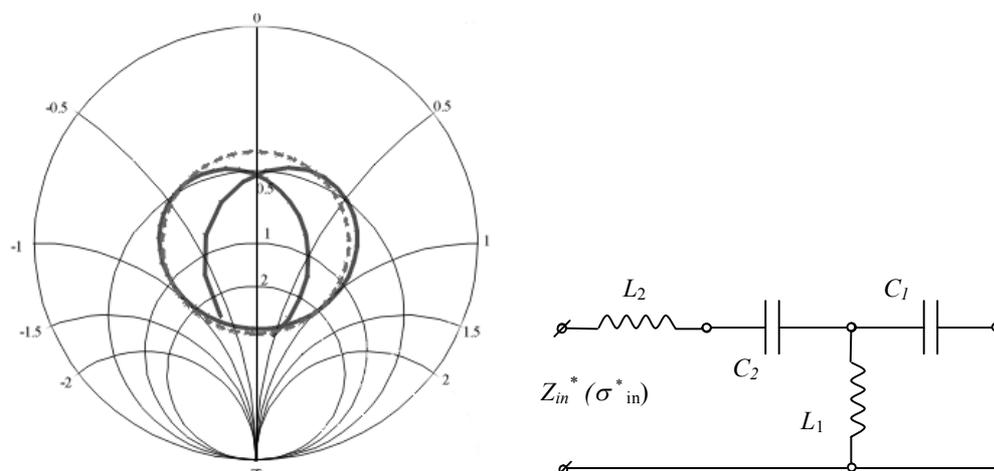


Рис. 7. Согласование импедансов с помощью последовательно-параллельных LC звеньев по диаграмме полных проводимостей Смита. Расчетные значения: $C_1 = 250$ пф, $L_1 = 0.065$ мкГн, $C_2 = 36$ пф, $L_2 = 0.26$ мкГн, полоса 38–71 МГц

На рис. 8 показана зависимость действительной $R(f)$ и, соответственно, мнимой $X(f)$ частей входного импеданса от частоты в декартовой системе координат до согласования, рассчитанная по формуле (1) для параметров, соответствующих рис. 1.

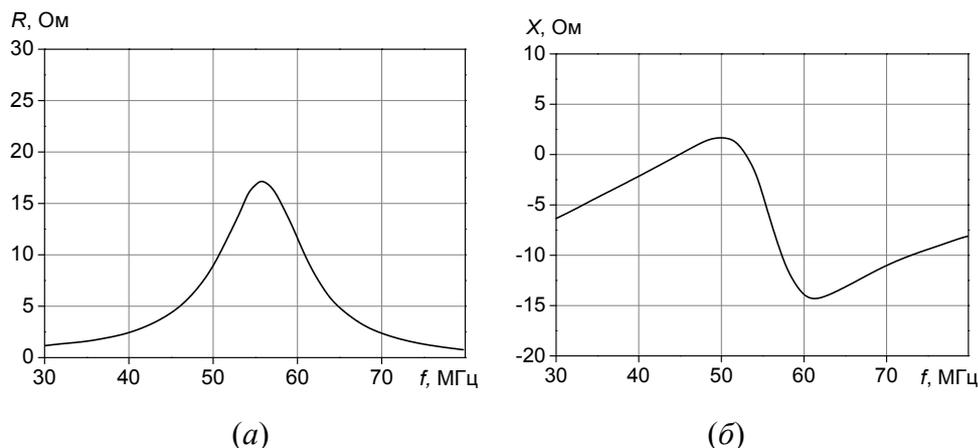


Рис. 8. Частотная зависимость действительной R (а) и мнимой X (б) частей входного импеданса пьезопреобразователя из ниобата лития, присоединенного к призме из парателлурита до согласования.

Изменение активной и реактивной составляющих импеданса после согласования по схеме рис. 7 показано на рис. 9.

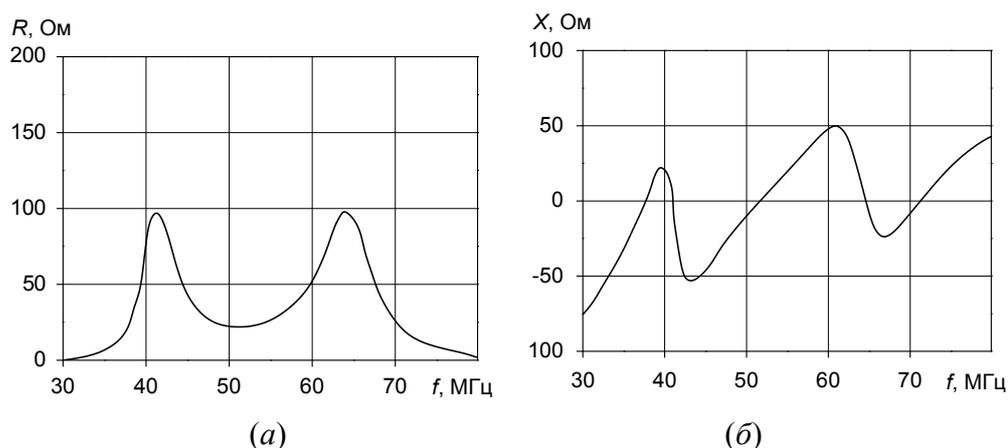


Рис. 9. Изменение активной R (а) и реактивной X (б) составляющих импеданса пьезопреобразователя после согласования по схеме рис. 7.

Из рис. 7 можно оценить эффект увеличения полосы согласования. Действительно, расчетная полоса согласования по уровню $KCB = 2,5$ при Г-образном LC звене (рис. 5) составляет 40...65 МГц. Расчетное значение полосы согласования, полученной с помощью согласующей цепи рис. 7, составляет 38...71 МГц.

Предложенный метод согласования по диаграмме Смита позволяет образом легко предсказать влияние на граничные частоты диапазона согласования подключения новых дополнительных реактивных элементов. Очевидно, например, что дополнительное параллельное подключение цепочки из параллельно соединенных индуктивности и емкости переведет проводимости на бесконечно низких и бесконечно высоких частотах из точки '0' в точку ' ∞ ' по диаграмме Смита перемещениями, соответственно, по и против часовой стрелки, трансформируя дополнительную часть частотного диапазона в области заданного КСВ. При этом электрическая схема согласующей цепи будет представлять собой схему фильтра, состоящего из комбинации последовательно-параллельного включения соответствующих LC-звеньев [4].

Рассмотренный метод синтеза согласующих цепей является удобным для практического согласования, т.к. последовательность операций, рассчитанных по предложенному алгоритму на диаграмме Смита рис. 3–7, моделирует работу типичного векторного анализатора цепей и может быть воспроизведена измерителем комплексных электрических импедансов (рис. 10). В качестве примера на рис. 11 и рис. 12 приведены фотографии, соответствующие расчетному финальному этапу согласования, изображенном на рис. 7.

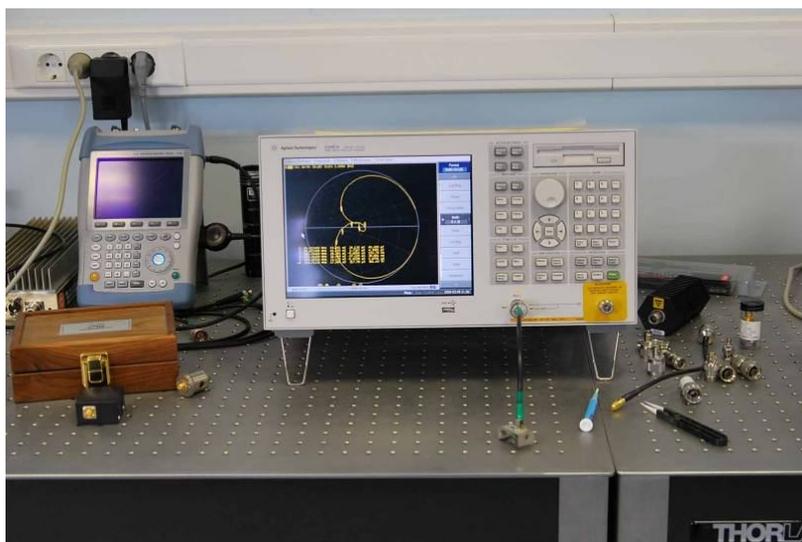


Рис. 10. Векторный анализатор цепей Agilent для согласования комплексных электрических импедансов пьезопреобразователей акустооптических устройств

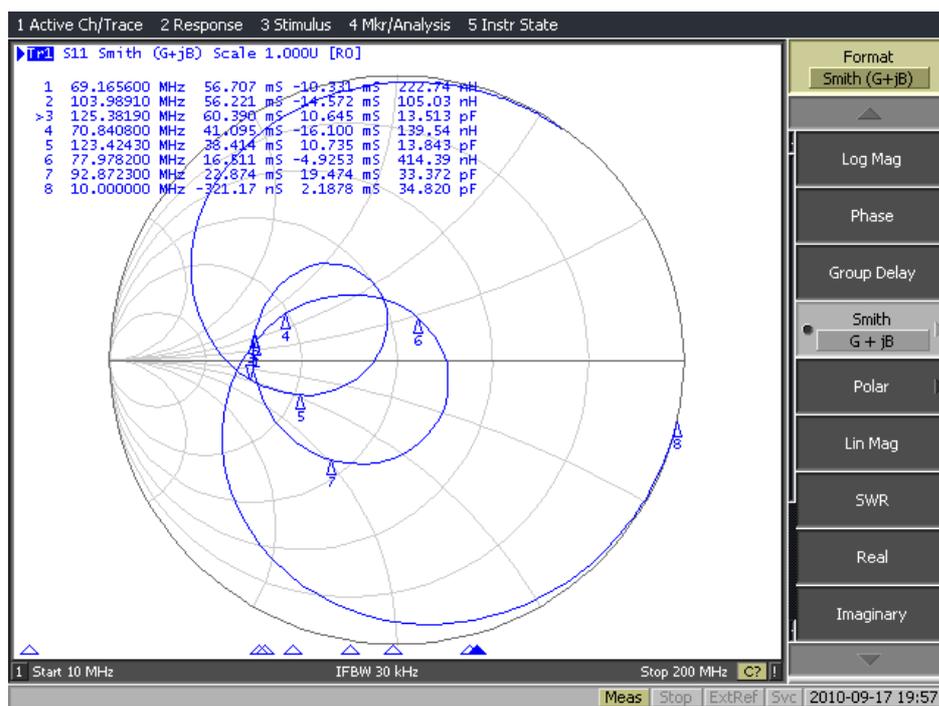


Рис. 11. Согласованный импеданс пьезопреобразователя акустооптического фильтра на основе монокристалла парателлурита на диаграмме Смита

Согласование с КСВ = 3.0 реализовано в диапазоне частот: 69...125 МГц (рис. 12). Из вышеизложенного следует, что достаточно высоких результатов можно добиться, используя четырехэлементную последовательно-параллельную согласующую цепь без введения дополнительного параллельного звена.

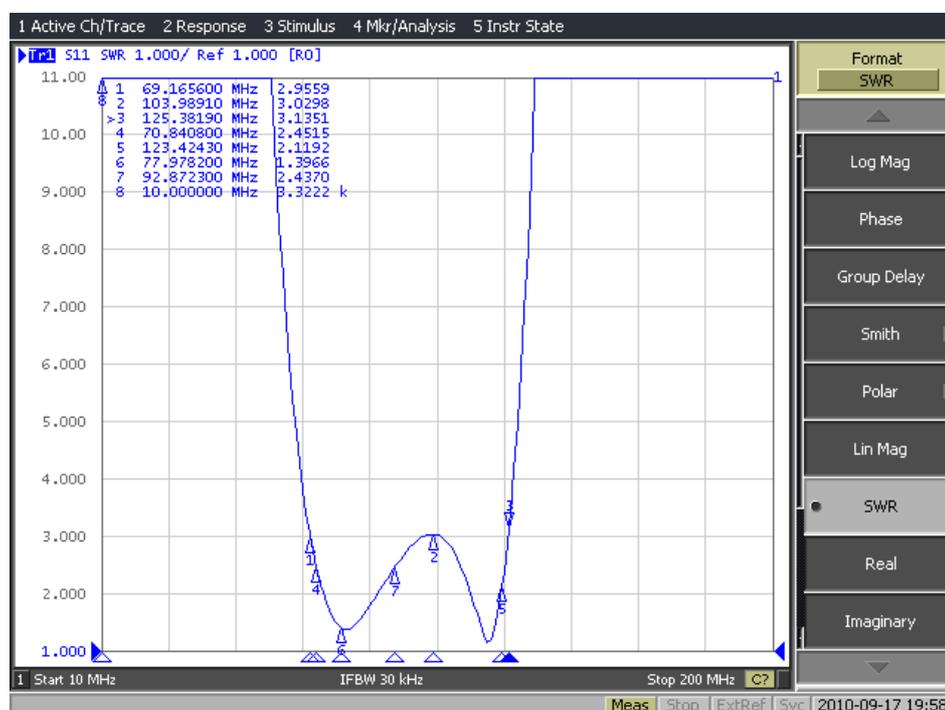


Рис. 12. Зависимость КСВ согласованного акустооптического фильтра (рис. 11) от частоты

Полоса согласования (рис. 12) является достаточной для большинства практических реализаций для одной из наиболее сложных с точки зрения согласования пар пьезопреобразователь – акустооптическая среда: сдвиговый $\text{LiNbO}_3 - \text{TeO}_2$. В менее критичных случаях вполне достаточно обойтись упрощенной Г-образной согласующей цепью (рис. 5).

Список литературы

1. Мэзон У. Физическая акустика. М: «Мир». Т. 1. 1966.
2. Sittig E.K. Physical Acoustics. V. 12. Ed. by W.Mason. 1967.
3. Molchanov V.Ya. and Makarov O.Yu. Phenomenological method for broadband electrical matching of acousto-optical device piezotransducers // J. Opt. Eng. 1999. V. 38, No. 7. P. 1127–1135.

4. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. М.: «Мир», 1990.
5. Залесский В.В. Анализ и синтез пьезоэлектрических преобразователей. Изд. Ростовский университет, 1971.
6. Goutzoulis A.P., Pape D.R. Design and fabrication of acousto-optic devices. Marcel Dekker. Inc. New York, 1994.
7. Yano T., Watanabe A. Broad bandwidth TeO₂ acoustooptic devices bonded with tin metal // IEEE Trans. SU. 1978. V.SU-25. P. 157-158.
8. Simic V., Marinkovic Z. Thin film interdiffusion of Au and In at room temperature // Thin Solid Films. 1977. V. 41. P. 57-61.
9. Bjøntegaard J., Buene L., Finstad T., Lønsjø O., Olsen T. Low temperature interdiffusion in Au/In thin film couples // Thin Solid Films. 1983. V. 101. P. 253-262.
10. Берлин Е.В., Двинин С.А, Сейдман Л.А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления пленок. М: «Техносфера», 2007.
11. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. Acoustooptic Devices and Their Applications. New York: Gordon and Breach Science Pub. 1989. P. 238 .

BROAD-BAND COMPLEX IMPEDANCE MATCHING OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS WITH THE CHANNEL OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEM

V. Ya. Molchanov¹, O. Yu. Makarov¹, D. V. Druina², O. V. Gasanov²

¹ National University of Science and Technology "MISIS"

Acousto-optical research center

² Tver State University

Method of synthesizing the electrical matching circuits of piezoelectric transducers for acoustooptic devices is proposed. The suggested algorithms use the physical specific features of Smith's diagrams of complex impedance and admittance without referring to the standard methods of microwave filter theory. The method easily allows to predict the effect of subsidiary reactive elements on the boundary frequencies of the matching frequency interval. The advantage of the given phenomenological approach is its illustrativeness and applicability for practical use.

Keywords: *acoustooptic devices, piezoelectric transducers, acoustic matching, electrical matching, Smith diagram*

Об авторах:

МОЛЧАНОВ Владимир Яковлевич – кандидат физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, зам. директора НТЦ акустооптики НИТУ МИСиС, *e-mail*: aocenter@mail.ru, 119049, Ленинский просп., д. 4;

МАКАРОВ Олег Юрьевич – старший научный сотрудник НТЦ акустооптики НИТУ МИСиС;

ДРУИНА Дарья Викторовна – аспирант кафедры прикладной физики ТвГУ; *e-mail*: sabioomoon@mail.ru;

ГАСАНОВ Олег Валерьевич – аспирант кафедры прикладной физики ТвГУ.