

**А.В. Помазанов, Д.П. Волик, С.С. Шибяев**

## **АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ДЕФЛЕКТОРЫ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ЧАСТОМОМЕРА**

*Методы функциональной электроники, к которым относится и акустооптический (АО) метод обработки радиосигналов, прочно занимают лидирующие позиции даже по сравнению с методами цифровой обработки сигналов, когда требуется за минимальное время в широкой полосе анализа с высокой точностью определить частотные и временные параметры нескольких одновременно действующих на входе радиоприёмного устройства сигналов. С развитием технологий и новых материалов их применение становится ещё более актуальным так как по интегральному показателю, учитывающему потребляемую мощность, габаритные размеры, массу акустооптические измерители занимают первые места среди прочих типов измерителей параметров радиосигналов. Акустооптические частотомеры как вид акустооптических измерителей параметров радиосигналов прочно занимают своё место в технике оценки параметров радиосигналов благодаря уникальным характеристикам – многосигнальность, разрешающая способность, сравнительно малые массогабаритные характеристики и потребляемая электрическая мощность при приемлемом динамическом диапазоне входных радиосигналов и точности оценки частоты. Данные устройства способны практически мгновенно осуществлять перенос радиосигнала из временной области в частотную и находят применение в системах пассивного радиоконтроля, для которых важными параметрами являются не только диапазон рабочих частот, частотное разрешение, точность измерения частоты и фазы анализируемых радиосигналов, а также энергопотребление, масса и габариты, которые становятся существенными при использовании радиотехнических измерителей в мобильных и космических измерительных комплексах. По этой причине во многих странах мира акустооптические частотомеры с успехом применяются в авиационной и космической технике. Технические параметры АО частотомеров такие как полоса рабочих частот, неравномерность коэффициента передачи до детекторного тракта, эффективность акустооптического взаимодействия и другие во многом определяются параметрами акустооптических дефлекторов (АОД). Из всех конструктивных элементов АО частотомеров АОД является самым дорогостоящим. С технологической точки зрения наряду с полупроводниковыми лазерами, фотоприёмными устройствами АОД при изготовлении так же требуют применение высоких технологий. Наряду с задачей разработки и изготовления АОД не маловажной и технически достаточно сложной, что отражается на стоимости образцов АОД, является задача разработки методов расчёта, контроля и измерения параметров АОД. Авторы настоящей работы, являясь сотрудниками лаборатории «Нанопластики и оптоэлектроники» Южного федерального университета, решили задачу расчёта технических и технологических параметров АОД двух диапазонов частот, разработали конструкторскую документацию, по которой были изготовлены образцы АОД, разработали методику испытаний АОД на соответствие требуемым техническим параметрам, провели испытания, по результатам которых осуществили корректировку параметров электродинамической структуры АОД. Приводятся расчёт параметров и математическое моделирование электродинамической структуры АОД, методика измерения параметров АОД, структурная схема измерительной установки, реализующей предложенный метод, результаты экспериментальных исследований образцов АОД двух диапазонов частот. Показано, что корректировка электродинамической структуры позволяет в ограниченных пределах изменять параметры АОД. Следовательно, с помощью лишь подстроечной ёмкости нельзя согласовать полученные параметры с данными ТЗ, а необходимо выполнить корректировку топологии согласующей системы. Теоретические расчёты и моделирование были подтверждены результатами экспериментальных исследований, изготовленных в соответствии с разработанной документацией образцов АОД.*

*Акустооптика; акустооптический частотомер; акустооптический дефлектор; Фурье-объектив; фотоприёмное устройство; дифракция; АО измеритель; лазер; фотодиодная линейка; телеобъектив; абберация; электродинамическая структура.*

A.V. Pomazanov, D.P. Volik, S.S. Shibaev

**THE ACOUSTO-OPTICAL DEFLECTORS OF THE AO CYMOMETER**

*Methods of functional electronics, particularly acousto-optical (AO) method of radiosignal processing, strongly lead even in comparison with DSP in cases requiring in minimum time period in wide analysis band with high accuracy to measure frequency and time parameters of several simultaneous signals. Development of new technologies and materials makes using the AO devices more actual since, according to integral features (consumption power, sizes, mass), they take leading places among other radiosignal parameters measurers types. AO cymometers as a kind of AO measurers take their firm place in an equipment of radiosignals parameters evaluation due to unique characteristics – multisignal mode, resolution, small sizes, acceptable input dynamic range and frequency evaluation accuracy. These devices are capable to practically instantly translate signals from time to frequency domain and find application in systems of passive radiocontrol where important parameters are not only dynamic range, evaluation accuracy of frequency and phase, but also energy consumption, mass and sizes that become considerable in mobile and space measurement complexes. By this reason in many countries AO cymometers have been successfully utilized in air and space engineering. Technical parameters of AO cymometers, such as band, nonuniformity of working channel, AO interaction efficiency etc. are largely defined by parameters of AOD (AO deflectors). Among all elements of AO device AOD are more expensive and together with lasers and photoreceivers AOD manufacturing also requires high technologies applying. Along with development and production not less important and technically complicated (that influences the AOD cost) is the task of development of ways computation, control and measurement of OD parameters. This work authors, being coworkers of laboratory "Nanophotonics and optoelectronics" of SFedU, have solved the task of calculation of technical and technological parameters of AOD of two frequency bands, have developed documentation, that allowed to manufacture several AOD samples, have developed the system of testing, that have been carried out, and implemented the correction of AOD electrodynamic structure parameters. Given are the parameters calculation and math modeling AOD electrodynamic structure, the method of measuring the AOD parameters, the layout of testing set. Also given the results of experimental investigations of developed AOD. Shown that electrodynamic structure correction allows in constrained range to change the AOD parameters and only adjusting capacitor does not allow to match parameters, but it is necessary to execute the matching system topology correction. Theoretical calculations and modeling have been confirmed by experimental results of manufactured AOD.*

*Acoustooptics; acoustooptic cymometer; acoustooptic deflector; Fourier-objective lens; photoreceiver; diffraction; AO measurer; laser; electrodynamic structure.*

**Введение.** В современной радиотехнике существует несколько различных направлений анализа сигналов, отличающихся физическими особенностями работы, имеющих свои достоинства и недостатки, а также свою специфику использования. Все эти средства могут как конкурировать, так и дополнять друг друга при решении сложных задач радиотехнического мониторинга. Одним из таких направлений является акустооптические радиотехнические устройства, отличающиеся быстродействием, пониженными массогабаритными характеристиками, используемые в задачах анализа спектров широкополосных радиосигналов различных частотных диапазонов [1–5]. Одним из важнейших элементов этих устройств являются акустооптические deflectоры (АОД), которые зачастую определяют в первую очередь такие технические параметры акустооптических радиотехнических измерителей как диапазон рабочих частот, чувствительность, неравномерность их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), динамический диапазон и др. [6–10].

В статье [3] приведена схема и методика проектирования двухканального акустооптического измерителя параметров радиосигналов (АОИ), работающего в полосе рабочих частот (600...1100) МГц, где указанный частотный диапазон обеспечивается использованием двух отдельных блоков, работающих каждый в своём отдельном поддиапазоне (600...850) МГц и (850...1100) МГц.

Данная статья посвящена описанию методики расчёта акустооптических дефлекторов применительно к двухканальному АОИ, с использованием которой были изготовлены и исследованы АОД, позволившие обеспечить параметры АОИ приведённые в [3].

**Методика расчёта АОД.** При разработке АОД необходимо решать ряд разнородных задач из областей акустики, оптики и СВЧ техники. Начальной задачей является выбор типа пьезопреобразователя (ПП) с последующим выбором материала светозвукопровода (СЗП) и конструкции используемого ПП.

Для реализации широкополосных АОД в СВЧ диапазоне целесообразно применение ПП с поверхностным возбуждением ультразвука, которые представляют собой антенную решётку – ВШП. Для разработки таких АОД к материалу СЗП предъявляются особые требования: он должен обладать как хорошими пьезоэлектрическими, так и акустооптическими свойствами. Из существующих материалов наиболее удовлетворяющим этим требованиям является ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), который давно и широко применяется для реализации акустооптических и электрооптических устройств, его основные параметры детально изучены и приведены [11].

Из анализа параметров ниобата лития следует, что для изготовления АОД с ВШП целесообразно использовать z-срез, т.к. в этом случае ориентированные вдоль оси X тангенциальные составляющие электрического поля возбуждают только медленную сдвиговую акустическую волну, т.е. паразитные типы волн не возбуждаются, и подведённая электрическая мощность полностью расходуется на возбуждение лишь полезной акустической волны.

Медленная сдвиговая волна, распространяется под небольшими углами к кристаллографической оси Z практически не изменяя своей скорости, величина которой составляет примерно 3600 м/с [11]. Остальные типы волн имеют большие скорости распространения, а, следовательно, их использование приводит к ухудшению разрешающей способности АОИ.

Использование данного среза с точки зрения эффективности преобразования радиоволны в акустическую не является оптимальным значение показателя АО качества  $M_2$  достаточна для разработки АОД  $M_2 = 2,917 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ .

Эффективность дифракции АОД является функцией расстройки относительно выполнения условия Брэгга, которая обусловлена как угловым спектром акустических волн, так и оптических, в общем данное утверждение описывается выражением [12]:

$$\eta = (0.5 \cdot q \cdot L_c)^2 \text{sinc}^2(0.5 \cdot L_c \sqrt{q^2 + \delta^2}). \quad (1)$$

В (1) коэффициент расстройки  $\delta = K \cdot \Delta\psi$  учитывает угловую отстройку  $\Delta\psi$  от выполнения брэгговского условия, а параметр  $q$  равен:

$$q = \frac{\pi \cdot n}{\lambda_0 \cos(\theta_n)} \sqrt{\frac{M_2 P_a}{L_c \cdot b}},$$

где  $P_a$  – акустическая мощность, связанная с электрической  $P_{СВЧ}$ , коэффициентом электромеханической связи ( $k$ )  $P_a = P_{СВЧ} \cdot k$ , который для z-среза составляет около 46 %,  $b$  – длина штырей ВШП.

Величина  $\Delta\psi$  является частотнозависимой, и определяется двумя факторами, во-первых, частотной зависимостью самого угла Брэгга, которая для случая изотропной дифракции описывается выражением  $\sin \theta_B = \pm 0.5 \cdot \lambda / \Lambda$ , а, во-вторых, частотной зависимостью углового спектра акустических полей, в частности, для ВШП максимум диаграммы направленности звука описывается выражением  $\phi_1 = V/(f \cdot 2d_g)$ , а его ширина  $\Delta\phi = V/fL_c$ . С учётом озвученных факторов, заменив  $\Delta\theta$  в [12] получена амплитудно-частотная характеристика АОД с ВШП, которая является основной характеристикой АОД, используемых в АОИ:

$$\xi(f) = \eta \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{m-1}{2} \left[ \frac{n \cdot V \cdot f}{\lambda_0 \cdot f_i^2} \left( \theta_n - \frac{\lambda_0 \cdot f}{2 \cdot n \cdot V} \right) + 1 \right] \right), \quad (2)$$

где  $m$  – количество электродов, входящих в состав ВШП,  $\theta_n$  – угол падения света относительно акустической волны,  $\eta$  – эффективность дифракции в максимуме АЧХ, описывается выражением (3)

$$\eta = \left( \frac{q \cdot d_g \cdot (m-0,5)}{2} \right)^2 \text{sinc}^2 \left( \frac{\lambda_0 \cdot f_i^2 \cdot l_0}{2 \cdot n \cdot V^2} \right), \quad (3)$$

Частотная зависимость (2) при равенстве  $\theta_n = \theta_B(f_i)$  будет иметь один основной максимум и побочные, отстающие от основного по уровню на величину 13–15 дБ. Так как полоса рабочих частот  $\Delta f$  определяется по уровню -3 дБ относительно максимума  $\xi(f)$ , то отстройкой угла падения от условия  $\theta_n = \theta_B(f_i)$ , можно добиться снижения эффективности дифракции на центральной частоте до уровня -3 дБ при этом полоса частот АО взаимодействия составит

$$\Delta f = 2,7 f_i / \sqrt{m}, \quad (4)$$

а угол, при котором будет выполнено это условие будет равен [13]:

$$\theta_n = \theta_B(f_i) \left( -2 - \frac{0,89}{m} \right) = \frac{\lambda_0 \cdot f_i}{2 \cdot n \cdot V} \left( -2 - \frac{0,89}{m} \right). \quad (5)$$

Центральная частота  $f_i$  рабочего диапазона  $\Delta f$  задаётся электрическим периодом ВШП  $d$ , который в 2 раза превышает геометрический период  $d_g$ . Для его приближенного расчёта [4] целесообразно использовать выражение:

$$d_g = \frac{nV^2}{\lambda_0 \cdot f_i^2}. \quad (6)$$

Ширина штырей  $x_0$  ВШП выбирается равной ширине зазора между ними  $x_0 = l_0 = 0,5 \cdot d_g$ .

Выбор длины штырей по минимуму ограничен расходимостью звука на световой апертуре  $D$  по уровню 3 дБ:

$$b = \sqrt{\frac{4V \cdot D}{(f_i - 0,5 \cdot \Delta f)}}. \quad (7)$$

Общая длина ВШП определяется суммой всех элементарных пьезопреобразователей:

$$L_c = 0,5 d_g (2m + 1). \quad (8)$$

Эскиз ВШП приведён на рис. 1.

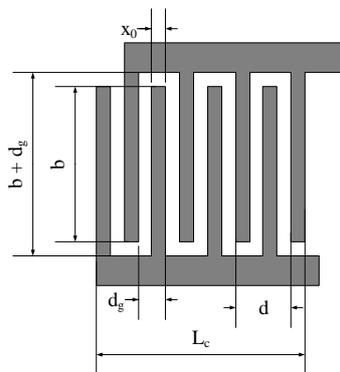


Рис. 1. Эскиз топологии встречноштыревого пьезопреобразателя

Проверка рассчитанных данных проводится построением АЧХ после подстановки в выражение (2) рассчитанных значений. По графику оцениваются значения центральной частоты и рабочего диапазона.

После расчёта геометрических параметров ВШП нужно оценить его электрические характеристики, определить частотную зависимость коэффициента отражения по мощности и КСВН, которые позволят определить необходимость электрического согласования комплексной нагрузки ВШП с подводимым трактом СВЧ.

В работах [14, 15] были предложены электрические схемы замещения поверхностных ВШП, которые в широком диапазоне частот совпадают с измеренными данными. В соответствии с этими моделями ВШП заменяется двумя параллельным соединением активного сопротивления излучения  $R_p(f)$ , статической ёмкости  $C_p$  и ёмкость пьезодобавки, которая, как следует из расчётов [15], примерно на 3 порядка меньше  $C_p$ , что позволяет исключить ёмкость пьезодобавки из рассмотрения и ограничиться анализом согласования параллельной RC-цепочки, для которой сопротивление излучения и статическая ёмкость могут быть определены из выражений:

$$R_{изл} = \frac{1}{m} \cdot \frac{C_{55} x_0}{e_{15}^2 V \cdot b} \xi; \quad (9)$$

$$C_p = m \frac{b \cdot K(\Delta_1)}{2K(\Delta)} \varepsilon_0 (1 + \varepsilon_r), \quad \Delta_1 = \sqrt{1 - \Delta^2}, \quad (10)$$

где  $K(x)$  – полный эллиптический интеграл первого рода,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость СЗП,  $\Delta = x_0 / d_g = 1/2$ ,  $C_{55}$  – модуль упругости,  $e_{15}$  – пьезоконстанта,

$$\xi(f) = \pi / \left( 2.863 + 0.637 \ln \left( \frac{2x_0 f}{V} \right) + \sin \left( 2\pi \frac{2x_0 f}{V} - \frac{\pi}{4} \right) / \sqrt{\frac{2x_0 f}{V} \pi} \right).$$

Как следует из приведённых соотношений, полное комплексное сопротивление ВШП можно описать выражением:

$$Z_p(f) = \left( \frac{1}{R_p(f)} + j2\pi \cdot f \cdot C_p \right)^{-1}. \quad (11)$$

А коэффициент отражения составит в данном случае [16, 17]:

$$\Gamma(f) = \frac{Z_p(f) - Z_v}{Z_p(f) + Z_v}, \quad (12)$$

где волновое сопротивление для нашего случая составляет  $Z_v = 50$  Ом. А выражение для КСВН в общем виде описывается соотношением [16, 17]:

$$SWR(f) = \frac{1 + |\Gamma(f)|}{1 - |\Gamma(f)|}. \quad (13)$$

Основной задачей электрического согласования является снижение коэффициента отражения  $\Gamma(f)$  в заданной полосе рабочих частот АОД. Иначе падающая волна будет интерферировать с отражённой, что приведёт к снижению электрической мощности, переданной в нагрузку.

Мощность, переданная в нагрузку  $P_{СВЧ}$ , может быть найдена с помощью коэффициента отражения следующим образом [16, 17]:

$$P_{СВЧ}(f) = P_g (1 - |\Gamma(f)|^2). \quad (14)$$

При расчёте согласующих цепей необходимо активную составляющую  $Z_p(f)$  приравнять к волновому сопротивлению линии передач, а реактивную составляющую, компенсировать реактивным элементом противоположного знака. Поэтому, очевидно, что для АОД, который представляет собой ёмкостную нагрузку, согласующие цепи реализуются преимущественно на индуктивных цепях.

В высокочастотном диапазоне номиналы согласующих элементов достаточно малы, поэтому, целесообразно их реализовывать по микрополосковой технологии на той же подложке, что и сам ВШП.

Для компенсации реактивной составляющей  $Z_p(f)$  выбирают индуктивность исходя из условия

$$L_0 = \left[ (2\pi f_0)^2 C_p \right]^{-1}. \quad (15)$$

После чего остаётся скомпенсировать лишь высокое активное сопротивление ВШП. Значение активного сопротивления каждого элементарного щелевого преобразователя составляет десятки килоом, но т.к. они соединены параллельно в ВШП, то его суммарное сопротивление ниже на порядок-два. Т.е. коэффициент трансформации обычно не превышает 10–20 в гигагерцовом диапазоне частот.

Согласование волновых сопротивлений обычно выполняют с помощью индуктивных трансформаторов. Типовые схемы согласующих цепей приведены на рис. 2 [7, 10, 15].

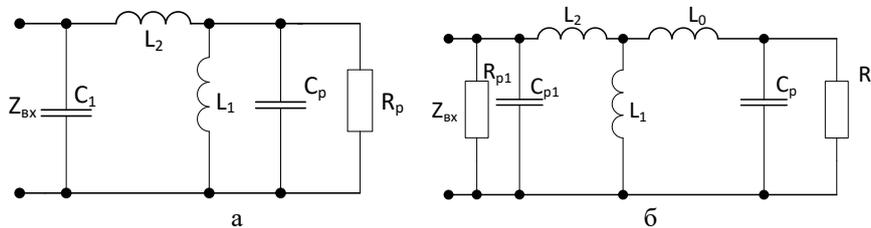


Рис. 2. Типовые схемы согласования ВШП АОД

Приведённые схемы являются эквивалентными схемами реального трансформатора [18], но этот подход используют в связи с тем, что в СВЧ диапазоне реализация трансформаторов затруднительна. Индуктивности в заданном диапазоне частот изготавливают непосредственно на одной той же грани кристалла, что и ВШП, их номиналы невелики и удобным становится подстройка, которую выполняют размещением короткозамыкающих элементов, позволяющих менять длину индуктивных полосков, значение индуктивности может быть оценено с использования выражения [16]:

$$L = 2l \left[ \ln \left( \frac{l}{w+t} \right) + 0,22 \frac{w+t}{l} + 1,19 \right]. \quad (16)$$

где  $L$  – индуктивность сегмента в нГн,  $l$ ,  $w$ ,  $t$  – длина, ширина и толщина полоска в сантиметрах соответственно.

Проблема соединения подводящего радиочастотного тракта с пьезокристаллом решается двумя путями. Либо для их соединения используется промежуточная плата, на которой также могут располагаться некоторые элементы подводящего СВЧ тракта, например, в схеме рис. 2,а это сосредоточенная ёмкость, либо все элементы цепи согласования располагаются на поверхности пьезокристалла, тогда согласующие ёмкости выполняются на поверхности пьезокристалла, в результате чего согласующая ёмкость на схеме замещения рис. 2,б. дополняется сопротивлением излучения  $R_{p1}$ . Использование более сложных схем согласования не целесообразно, так как возрастут потери в согласующих элементах.

Выбор номиналов согласующих элементов направлен на минимизацию как коэффициента отражения  $\Gamma^2(f)$  так и его неравномерности  $\Delta\Gamma^2(f)$  в полосе рабочих частот, величина которой должна быть не больше 3 дБ.

Комплексное полное сопротивление АОД по входе при использовании согласующей цепи, показанной на рис. 2,а может быть определена следующим образом.

$$Z_{11} = j\omega L_2 + \left( j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_1} + \frac{1}{R_p} \right)^{-1}, \quad Z_{1ex} = \left( j\omega C_1 + \frac{1}{Z_{11}} \right)^{-1}.$$

Для цепи 2,б комплексное входное сопротивление может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} Z_{21} &= \left( j\omega C_p + \frac{1}{R_p} \right)^{-1}, & Z_{22} &= Z_{21} + j\omega L_0, \\ Z_{23} &= \left( Z_{22}^{-1} + j\omega L_1^{-1} \right)^{-1}, & Z_{24} &= Z_{23} + j\omega L_2, \\ Z_{25} &= \left( j\omega C_{p1} + \frac{1}{R_{p1}} \right)^{-1}, & Z_{2ex} &= \left( Z_{25}^{-1} + Z_{24}^{-1} \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Далее входное сопротивление оптимизируется для выполнения условия потерь на рассогласование и их неравномерности в полосе частот выбором номиналов соответствующих элементов.

В соответствии с изложенной методикой были рассчитаны параметры ВШП для НЧ и ВЧ АОД, которые должны были обеспечивать эффективность дифракции на уровне 0,5 %/Вт, каждый в своей полосе частот, а значение КСВН должно быть в пределах 7 при неравномерности 3 дБ.

Сначала были определены параметры ВШП:

Для НЧ АОД:  $d_g = 65$  мкм;  $x_g = 33$  мкм;  $m = 24$ ;

Для ВЧ АОД:  $d_g = 36$  мкм;  $x_g = 18$  мкм;  $m = 44$ .

Расчётные параметры схем замещения данных АОД составили:

Для НЧ АОД:  $C_p = 13$  пФ;  $R_p(f_{01}) = 1,23$  кОм;

Для ВЧ АОД:  $C_p = 25,66$  пФ;  $R_p(f_{02}) = 0,41$  кОм.

Расчётные значения элементов цепей согласования составили:

Для НЧ АОД:  $L_1 = 2,8$  нГн;  $L_2 = 1,322$  нГн,  $C_1 = 2,6$  пФ;

Для ВЧ АОД:  $L_1 = 0,82$  нГн;  $L_2 = 4,1$  нГн,  $C_1 = 5,65$  пФ.

В итоге теоретическая частотная зависимость КСВН для НЧ АОД приведена на рис. 3,а, а для ВЧ диапазона на рис. 3,б.

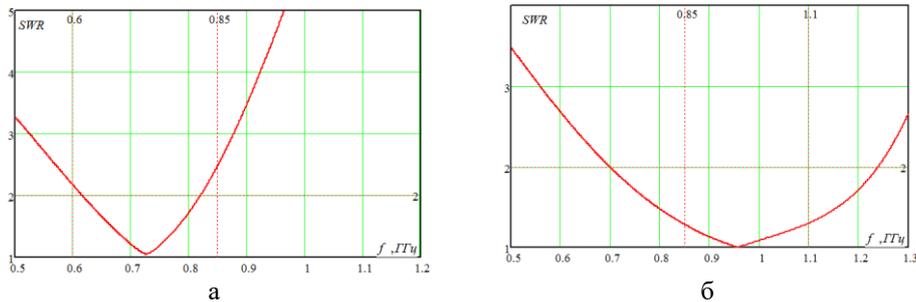


Рис. 3. Расчётные частотные зависимости КСВН (SWR) для НЧ (а) и ВЧ (б) АОД

**Экспериментальное исследование АОД.** Для рассчитанных выше АОД были реализованы электродинамические системы возбуждения ультразвука совместно с цепями согласования, с дискретной входной ёмкостью  $C_1$  и индуктивностями в микрополосковом исполнении.

Была выпущена партия АОД каждого из поддиапазона, которые впоследствии подверглись экспериментальной проверке.

Для исследования КСВН АОД использовался векторный анализатор цепей R&S@ZVA8. Измерения проводились в полном диапазоне рабочих частот двухканального АОИ, результаты измерений приведены на рис. 4.

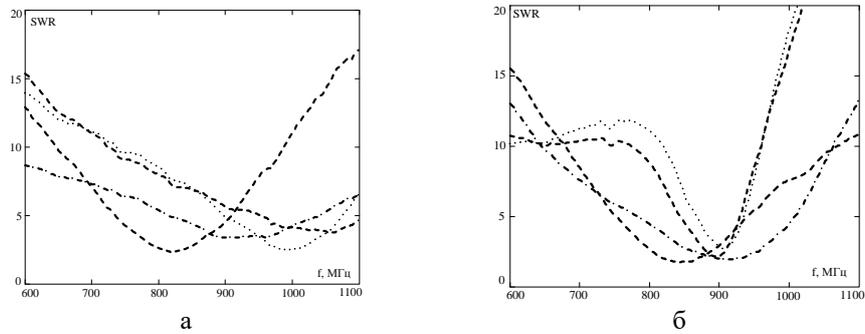


Рис. 4. Экспериментальные частотные зависимости КСВН (SWR) для НЧ (а) и ВЧ (б) АОД

Исследование АЧХ АОД производилось на специализированном автоматизированном стенде [19–21], в котором был использован ИК лазер MLL-III-905L, обеспечивающий работу в заданном спектральном диапазоне, в остальном стенд относительно изменений не претерпел.

На рис. 5, 6 приведены результаты измерений АЧХ изготовленных АОД, причём измерения проводились для обоих лепестков диаграммы направленности ВШП, рисунки а и б соответственно.

По результатам экспериментального исследования изготовленных опытных образцов АОД можно заключить, что уровень их максимальной эффективности дифракции соответствует расчётным значениям. Результаты измерения АЧХ показали, что полосы рабочих частот опытных образцов составляют 150...200 МГц по уровню неравномерности 3 дБ, вместо необходимых 250 МГц. Кроме того, было отмечено, что АЧХ отдельных лепестков диаграммы направленности ВШП отличаются, причём эти отличия носят неконтролируемый характер, что, по всей видимости, вызвано несимметричностью топологии на поверхности кристалла.

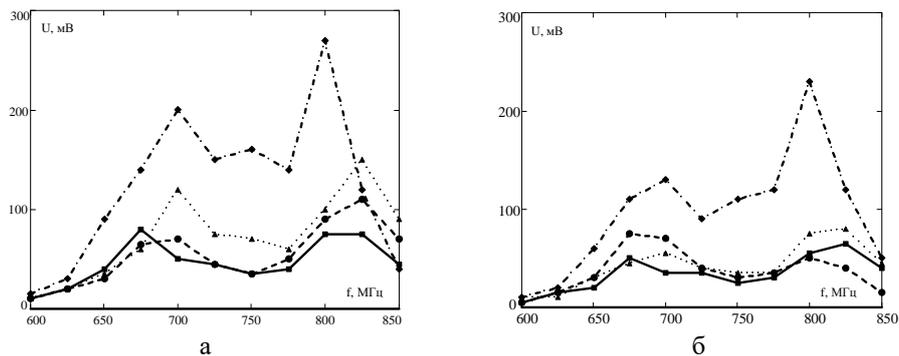


Рис. 5. Экспериментальные АЧХ для НЧ АОД для двух лепестков диаграммы направленности

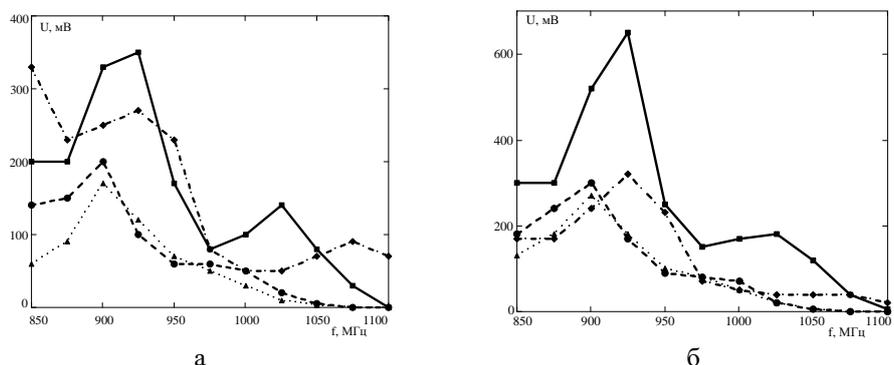


Рис. 6. Экспериментальные АЧХ для ВЧ АОД для двух лепестков диаграммы направленности

Частотные зависимости КСВН отличаются от расчётных, для корректировки последних были использованы подстроечные ёмкости платы согласования АОД. Выбирались несколько ёмкостей из стандартного ряда E24, номиналы которых, близки к рекомендуемому значению, полученному расчётным путём на первом этапе. Результирующие КСВН приведены на рис. 7.

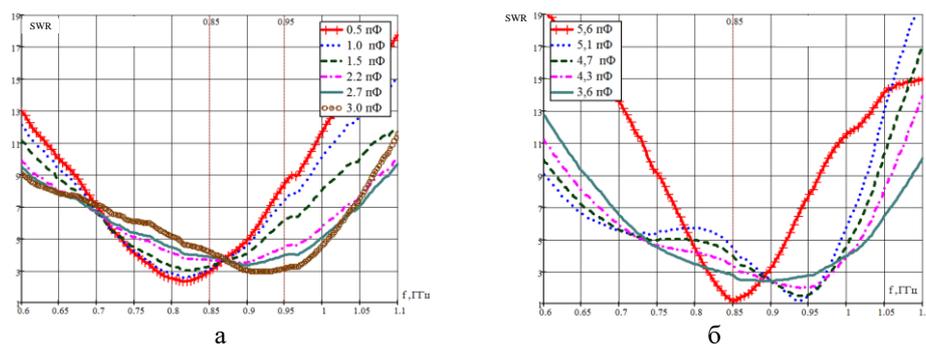


Рис. 7. Экспериментальные частотные зависимости КСВН (SWR) для НЧ (а) и ВЧ (б) АОД для разных значений подстроечных ёмкостей

По результатам анализа полученных характеристик можно заключить, что для образца НЧ АОД уменьшение ёмкости приводит к смещению минимума КСВ в нужном направлении на величину до 100 МГц и уменьшению его минимального значения до величины около 2, но при этом наблюдается снижение полосы частот по заданному уровню неравномерности до (100-150) МГц. Следовательно, с помощью лишь подстроечной ёмкости нельзя согласовать полученные параметры с данными ТЗ, а необходимо выполнить корректировку топологии согласующей системы. Для образца ВЧ АОД уменьшение ёмкости приводит к смещению минимума КСВ в нужном направлении также на величину около 50 МГц, при этом увеличивается его минимальное значение до величины около 3, но при этом наблюдается расширение полосы частот по заданному уровню неравномерности до необходимой величины. В этом случае также требуется корректировка топологии.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При разработке цепей согласования в расчёт не брались значения контактных ёмкостей, а также значения индуктивностей золотых 30 микронных проводников, используемых для соединения платы согласования с топологией кристалла и подстроечных

площадок согласующих индуктивностей. В процессе моделирования их влияние сложно учесть, так как их длина неодинакова и определяется технологическими возможностями. Влияние вышеназванных факторов может быть оценено лишь экспериментально и, учитывая полученные предварительные результаты, проведена корректировка топологии.

**Заключение.** В работе показана методика проектирования и реализация акустооптических дефлекторов, используемых в составе акустооптических устройств радиотехнического назначения. Теоретические расчёты и моделирование при проектировании были подтверждены результатами экспериментальных исследований изготовленных мелкой серии акустооптических дефлекторов. Таким образом, предложенная методика расчёта может использоваться для разработки АОД, используемых в АОИ, с некоторой возможностью поправки с использованием подстроечных микрополосковых и дискретных элементов цепей согласования СВЧ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков В.Н., Наумов К.П. Акустооптические сигнальные процессоры. – М.: Сайнс-пресс, 2003.
2. Шibaев С.С., Помазанов А.В., Роздобудько В.В. Акустооптические измерители параметров радиосигналов: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 233 с.
3. Помазанов А.В., Шibaев С.С., Волик Д.П. Макет двухканального малогабаритного акустооптического частотомера // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5 (207). – С. 157-165.
4. Волик Д.П., Шibaев С.С., Помазанов А.В. Принципы построения и реализация акустооптических измерителей параметров радиосигналов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 175-182.
5. Пустовойт В.И., Пожар В.Э. Акустооптические спектральные устройства: состояние и перспективы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2011. – С. 6-15.
6. Шibaев С.С., Волик Д.П., Роздобудько В.В. Акустооптический приёмник-частотомер на основе дефлектора с противофазным возбуждением ультразвука // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2008. – № 4. – С. 32-37.
7. Волик Д.П., Роздобудько В.В. Анализ амплитудно-частотной характеристики акустооптического дефлектора с поверхностным аподизированным пьезопреобразователем // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, № 6. – С. 124-128.
8. Акустооптический СВЧ дефлектор. Шibaев С.С., Волик Д.П., Новиков В.М., Помазанов А.В. Патент на полезную модель RU 145757 U1, 27.09.2014. Заявка № 2013153225/28 от 29.11.2013.
9. Vynnyk D.M., Reshotka O.G., Hajduchok V.G., Sugak D.Yu., Vakiv M.M. High frequency acousto-optic deflectors with bulk waves excitation of piezoelectric crystals surface // Modern information and electronic technologies. – 2016. – Vol. 1, No. 17. – P. 204-205.
10. Волик Д.П., Роздобудько В.В. Разработка и исследование акустооптического СВЧ дефлектора с секционированным поверхностным пьезопреобразователем // Вопросы специальной радиоэлектроники. – 2010. – № 2. – С. 110-122.
11. Блистанов А.А. [и др.]. Акустические кристаллы: Справочник / под ред. М.И. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.
12. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Радио и связь, 1978.
13. Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985.
14. Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1981. – 184 с.
15. Краковский В.А. Возбуждение объёмных упругих волн с поверхности пьезокристаллов симметрии  $3m$  // Известия ВУЗов. Физика. – 1997. – Т. 40, № 5. – С. 27-34.
16. Черне Х.И. Индуктивные связи и трансформации в электрических фильтрах. – М.: Связьиздат, 1962. – 316 с.

17. *Вольман В.И.* Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств. – М.: Радио и связь, 1982. – 326 с.
18. *Матей Г.Л., Янг Л., Джонс М.Т.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. – 1971. – 439 с.
19. *Шибяев С.С., Волик Д.П.* Автоматизированный стенд для акустооптических измерений // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 141.
20. *Шибяев С.С., Волик Д.П.* Автоматизация акустооптических измерений // Специальная техника. – 2014. – № 2. – С.32–36.
21. *Шибяев С.С., Помазанов А.В., Волик Д.П.* Методы и средства акустооптических измерений: учебное пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. – 124 с.

## REFERENCES

1. *Ushakov V.N., Naumov K.P.* Akustoopticheskie signal'nye protsessory [Acousto-optic signal processors]. Moscow: Sayns-press, 2002, 80 p.
2. *Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Rozdobud'ko V.V.* Akustoopticheskie izmeriteli parametrov radiosignalov: monografiya [Acousto-optical measuring parameters of radio signals: monograph]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, 233 p.
3. *Pomazanov A.V., Shibaev S.S., Volik D.P.* Maket dvukhkanal'nogo malogabaritnogo akustoopticheskogo chastotomera [The prototype of two-channel small-sized AO cymometer]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5 (207), pp. 157-165.
4. *Volik D.P., Shibaev S.S., Pomazanov A.V.* Printsipy postroeniya i realizatsiya akustoopticheskikh izmeriteley parametrov radiosignalov [The principles of construction and realization of the acousto-optic measuring parameters of radio signals], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 175-182.
5. *Pustovoyt V.I., Pozhar V.E.* Akustoopticheskie spektral'nye ustroystva: sostoyanie i perspektivy [Acoustooptic spectral devices: state and prospects], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2011, pp. 6-15.
6. *Shibaev S.S., Volik D.P., Rozdobud'ko V.V.* Akustoopticheskiy priemnik-chastotomer na osnove deflektora s protivofaznym vzbuzhdeniem ul'trazvuka [Acoustooptic receiver-cymometer on the base of deflector with anti-phase excitation of ultrasound], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [News of russian universities. Radioelectronics], 2008, Issue 4, pp. 32-37.
7. *Volik D.P., Rozdobud'ko V.V.* Analiz amplitudno-chastotnoy kharakteristiki akustoopticheskogo deflektora s poverkhnostnym apodizirovannym p'ezopreobrazovatelem [Analysis of amplitude-frequency response of AO deflector with surface apodized piezoelectric transducer], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Journal], 2009, Vol. 79, No. 6, pp.124-128.
8. *Shibaev S.S., Volik D.P., Novikov V.M., Pomazanov A.V.* Akustoopticheskiy SVCh deflektor [Acoustooptic SHF deflector], *Patent na poleznuyu model* [Patent on utility model], RU 145757 U1, 27.09.2014.
9. *Vynnyk D.M., Reshotka O.G., Hajduchok V.G., Sugak D.Yu., Vakiv M.M.* High frequency acousto-optic deflectors with bulk waves excitation of piezoelectric crystals surface, *Modern information and electronic technologies*, 2016, Vol. 1, No. 17, pp. 204-205.
10. *Volik D.P., Rozdobud'ko V.V.* Razrabotka i issledovanie akustoopticheskogo SHF deflektora s sektionirovannym poverkhnostnym p'ezopreobrazovatelem [Development and research of AO SHF deflector with section surface piezoelectric transducer], *Voprosy spetsialnoy radioelektroniki* [Questions of special radioelectronics], 2010, No. 2, pp. 110-122.
11. *Akusticheskie kristally: Spravochnik* [Acoustic crystals: Reference book], pod red. M.I. Shaskolskoy. Moscow: Science, 1982, 632 p.
12. *Magdich L.N., Molchanov V.Ya.* Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye [Acousto-optic devices and their application]. Moscow: Radio i svyaz', 1978, 112 p.
13. *Balakshiy V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E.* Fizicheskie osnovy akustooptiki [Physical basis of acousto-optics]. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 278 p.
14. *Morozov A.I., Proklov V.V., Stankovskiy B.A.* P'ezoelektricheskie preobrazovateli dlya radioelektronnykh ustroystv [Piezoelectric transducers for radioelectronic devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 184 p.

15. *Krakovskiy V.A.* Vozbuzhdenie ob'emnykh uprugikh voln s poverkhnosti p'ezocrystallov simmetrii 3m [Excitation of bulky elastic waves from surface of piezoelectric crystals of symmetry 3m], *Izvestiya VUZov. Fizika* [Izvestiya VUZov. Physics], 1997, Vol. 40, No. 5, pp. 27-34.
16. *Cherne H.I.* Induktivnye svyazi i transformatsii v elektricheskikh filtrah [Inductive couples and transformations in electric filters]. Moscow: Svyaz'izdat, 1962, 316 p.
17. *Volman V.I.* Spravochnik po raschyotu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv [Reference book on calculation and design of SHF strip devices], Moscow: Radio i svyaz', 1982, 326 p.
18. *Matey G.L., Yang L., Dzgons M.T.* Filtry SVCh, soglasuyuschiye tsepi i tsepi svyazi [Filters of SHF, matching networks and couple networks], 1971. 439 p.
19. *Shibaev S.S., Volik D.P.* Avtomatizirovannyi stend dlya akustoopticheskikh izmereniy [Automated set for AO measurements], *Pribory i tekhnika experimenta* [Instrumentation and experiment technique], 2014, No. 4, pp.141.
20. *Shibaev S.S., Volik D.P.* Avtomatizatsiya akustoopticheskikh izmereniy [Automatization of AO measurements], *Spetsial'naya tekhnika* [Instrumentation and experiment technique], 2014, No. 2, pp. 32-36.
21. *Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Volik D.P.* Metody i sredstva akustoopticheskikh izmereniy: uchebnoe posobie [Methods and means of acoustooptic measurements: tutorial], Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2018, 124 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

**Помазанов Александр Васильевич** – Южный федеральный университет; e-mail: pav\_tsure@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634361573; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

**Волик Денис Петрович** – e-mail: DVLbest@mail.ru; кафедра радиотехнической электроники; старший преподаватель.

**Шибяев Станислав Сергеевич** – e-mail: sheab@list.ru; лаборатория нанофотоники и оптоэлектроники; с.н.с.; к.т.н.

**Pomazanov Alexander Vasilievich** – Southern Federal University; e-mail: pav\_tsure@mail.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634361573; the department of telecommunication systems informational security; associate professor; cand. of eng. sc.

**Volik Denis Petrovich** – e-mail: DVLbest@mail.ru; the department of radioengineering electronics; senior lecturer.

**Shibaev Stanislav Sergeevich** – e-mail: sheab@list.ru; laboratory of nanophotonics and optoelectronics; senior scientist; cand. of eng. sc.