

УДК 621.372.8

А.Е. Иванов<sup>1</sup>, А.Е. Львов<sup>2</sup>, Г.И. Шишков<sup>1</sup>**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПЛАСТИН  
И РАЗБРОСА ДИАМЕТРОВ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ  
НА ОСЛАБЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ АТТЕНУАТОРОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный  
институт «Кварц» им. А.П. Горшкова<sup>2</sup>

Описан метод оценки влияния допусков на характеристики поляризационного аттенюатора. Приведены графические характеристики и физическая трактовка результатов расчета.

*Ключевые слова:* поляризационные аттенюаторы, резистивные пленки, поглощение, ослабление, погрешности.

**Введение**

Поляризационные аттенюаторы (ПА) относятся к классу плавнопеременных измерительных аттенюаторов, предназначенных для получения прямоотсчетного ослабления высокочастотных сигналов в волноводных трактах. ПА используются как встраиваемые в различные приборы, так и в качестве образцовых мер ослабления, что приводит к необходимости рассмотрения влияния различных факторов на величину ослабления и определения погрешности ослабления.

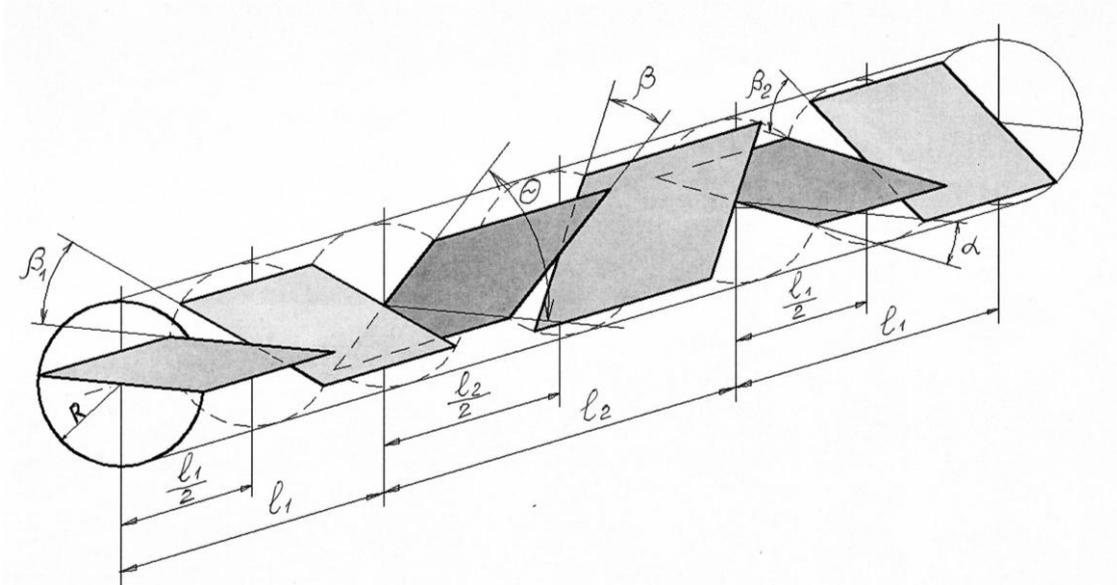
В данной статье предлагается метод расчета, позволяющий оценить влияние ряда технологических параметров на ослабление поляризационного аттенюатора (ПА). В отличие от известных методик расчета [1], основанных на расчете отдельных элементов ПА, в данной работе предлагается сквозной расчет характеристик с использованием аналитического алгоритма расчета от входа до выхода аттенюатора. За базовую модель расчета взята модель расчета некоторых погрешностей ПА, изложенная в [2] и дополненная неоднородностями в виде "изломов" поглощающих пластин (резистивных пленок) в статорах аттенюатора; кроме того, методом теории возмущений учтена частотная зависимость ослабления ПА. (Термином "излом" будем сокращенно называть неплоскостность пластины, моделируемую в [2] в виде поворота одной пластины относительно другой вокруг продольной оси, проведенной вдоль ПА по центру пластины, на некоторый угол – угол "излома".)

Расчеты проведены в одномодовом приближении, когда основной волной в круглом волноводе является Н<sub>11</sub>. Возможность этого теоретически обоснована в работе [3]. Экспериментальная проверка базовой и построенной на ее основе предлагаемой модели расчета содержится в [2, 3].

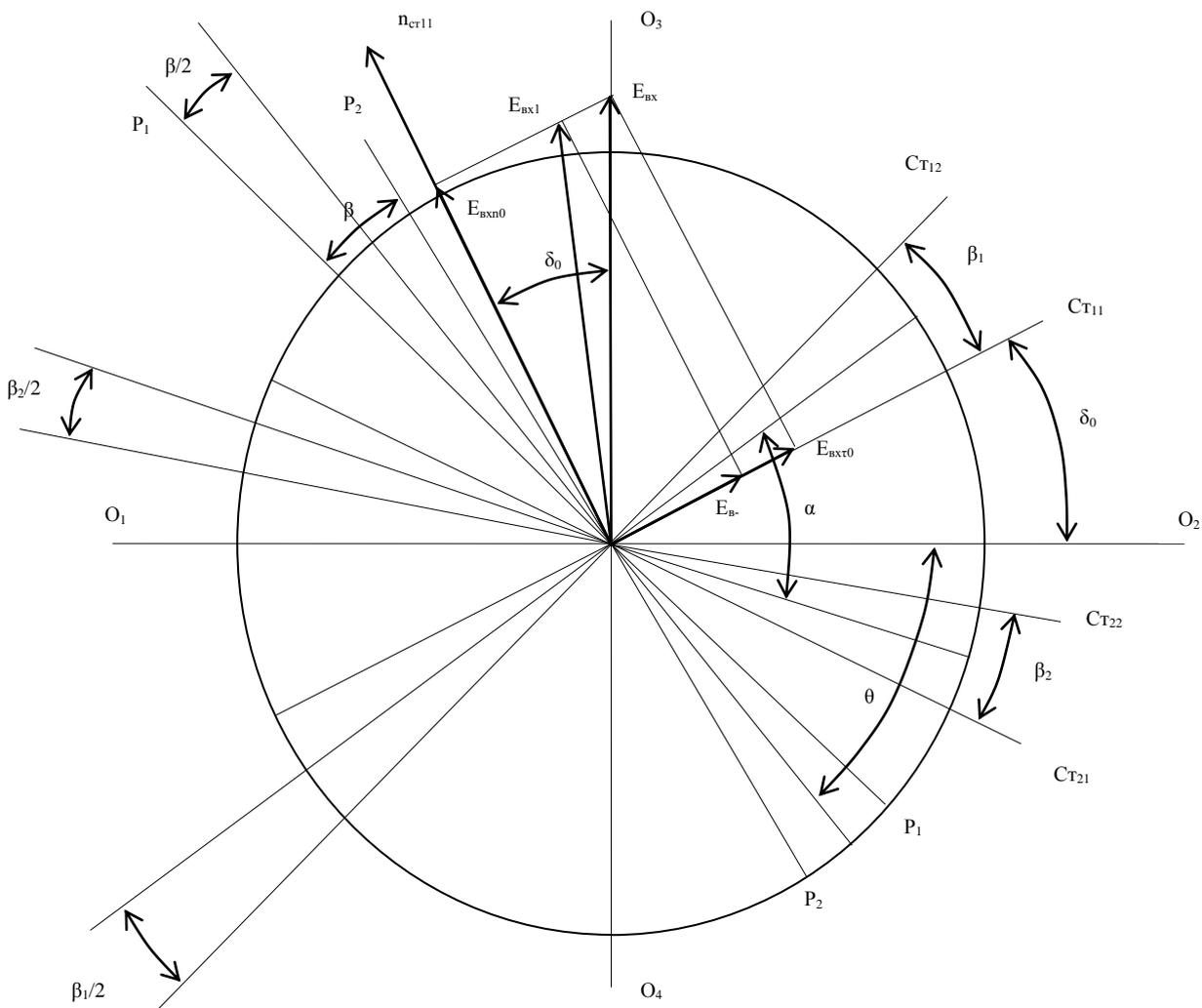
**Расчетный алгоритм**

На рис. 1 изображена упрощенная схема волноводного канала поляризационного аттенюатора. На практике, в случае работы с каналами прямоугольных сечений, где основной волной является Н<sub>10</sub>, данная конструкция дополняется плавными переходами с прямоугольного на круглый волноводы, которые в настоящее время достаточно хорошо отработаны экспериментально и, как вспомогательно играющие роль, для нашей модели рассматриваться не будут. Напомним лишь условие одномодовости, связывающее размер широкой стенки прямоугольного волновода и радиуса  $R$  круглого волновода [1]:

$$R=0,5865a.$$



**Рис. 1. Упрощенная структурная схема поляризационного аттенюатора:**  
 $l_1$  – длина входного или выходного статора;  $l_2$  – длина ротора;  $\beta_{1,2}$  – углы изломов входного и выходного статора;  $\beta$  – угол излома ротора;  $R$  – радиус круглого волновода;  $\alpha$  – угол юстировки;  $\theta$  – угол поворота ротора



**Рис. 2. Элементы поперечных сечений круглых волноводов ПА, совмещенные в одной плоскости**

На рис. 2 условно изображены поперечные сечения круглых волноводов проходного канала ПА со всеми поглощающими вставками и координатами их геометрического положения, совмещенные, для упрощения анализа, в одной плоскости. На рис.2: СТ11, СТ12 – первая и вторая половины входного статора; СТ21, СТ22 – первая и вторая половины выходного статора; Р1, Р2 – первая и вторая половины ротора;  $\delta_0$  - возможная угловая техническая несоосность входного статора по отношению ко входному тракту внешнего источника сигнала;  $\alpha$  – угол юстировки поляризационного аттенюатора. (Параметры  $\beta_{1,2}$ ,  $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$  – пояснены ранее на рис. 1).

Предполагая направление вектора напряженности электрического поля вдоль оси ОЗ-О4  $\vec{E}_{\text{вх}}$ , определим проекции на нормаль nСТ11 и касательную к первой половине входного статора СТ11 в виде:

$$\begin{aligned} E_{\text{вх}n0} &= E_{\text{вх}} \cdot \cos \delta_0, \\ E_{\text{вх}\tau 0} &= E_{\text{вх}} \cdot \sin \delta_0. \end{aligned}$$

На входе второй половины входного статора касательная компонента уменьшится вследствие поглощения в резистивной пленке до величины:

$$E_{\text{вх}\tau 1} = E_{\text{вх}\tau 0} \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}},$$

где коэффициент  $\alpha_3$  учитывается по методу теории возмущений [4]:

$$\alpha_3 = \frac{193,483}{R \cdot R_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\lambda/\lambda_{\text{кр}}\right)^2}},$$

где  $R_n$  – поверхностное сопротивление резистивной пленки (Ом/□);  $\lambda_{\text{кр}}$  – критическая длина волны Н11 в круглом волноводе.

(В работах [5,6,7] обнаружена опечатка: у выражения  $\alpha_3$  в знаменателе под корнем вместо  $0,086 (\lambda_{\text{ср}}/\lambda_{\text{кр}})^2$  следует читать  $0,086 (\lambda_{\text{ср}}/R)^2$ ).

Тангенциальная и нормальная составляющие образуют на входе второй половины входного статора новое поле  $E_{\text{вх}1}$ . Осуществляя аналогичным образом дальнейшую трансформацию  $E_{\text{вх}1}$  на вторую половину входного статора, на элементы ротора и выходного статора по рис. 2, получаем цепочку преобразований для вычисления ослабления поляризационного аттенюатора.

$$A = -20 \log_{10} F,$$

где

$$F = F1 \cdot F2 \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{2} + \delta_0 - \arctg \left\{ \text{ctg} \delta_{p5} \cdot e^{\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right\} \right];$$

$$F1 = \cos \alpha_{p1j} \cdot \sqrt{\text{tg}^2 \alpha_{p1j} + e^{-\alpha_3 \cdot l_2}}$$

$$F2 = \prod_{i=1}^5 \cos x_i \sqrt{1 + \text{tg}^2 x_i \cdot e^{-y_i \alpha_3}}$$

где величины  $x_i$  и  $y_i$  определяются таблицей:

$i$	$x_i$	$y_i$
1	$\delta_0$	$l_1$
2	$\delta_1 + \beta_1$	$l_1$
3	$\delta_{p1} + \beta$	$l_2$
4	$\delta_{p3}$	$l_1$
5	$\delta_{p5}$	$l_1$

где

$$\delta_1 = \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right];$$

$$\delta_2 = \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg}(\delta_1 + \beta_1) \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right];$$

$$\alpha_{p,j} = \frac{\pi}{2} + \delta_2 + \frac{\beta}{2} - \theta - \left( \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta_2}{2} \right);$$

$$\delta_{p1} = \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{ctg} \alpha_{p1,j} \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_2}{2}} \right];$$

$$\delta_{p2} = \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg}(\delta_{p1} + \beta) \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_2}{2}} \right];$$

$$\delta_{p3} = \frac{\beta}{2} + \theta - \left( \frac{\alpha}{2} + \delta_0 \right) - \frac{\beta_2}{2} - \delta_{p2} ;$$

$$\delta_{p4} = \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg} \delta_{p3} \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right];$$

$$\delta_{p5} = \delta_{p4} + \beta_2.$$

### Результаты расчета

На рис. 3–10 приведены зависимости, полученные при расчете по данному алгоритму для диапазона частот 53,57÷78,33 (ГГц) ПА (что в переводе на стандартное прямоугольное сечение волновода соответствует  $3,6 \times 1,8$  мм<sup>2</sup>). Параметры структуры ПА:  $l_1=15,75$  (мм),  $l_2=31,3$  (мм),  $R=d/2=1,836$  (мм) (за исключением рис. 9 и рис. 10, где  $d$  выступает в качестве параметра). На рис. 3–6 приведены результаты расчета погрешностей ослабления от "изломов" статора и ротора на частоте 78,33 (ГГц).

На рис. 3 представлены кривые погрешности ослабления, возникающие вследствие "излома" на угол  $\beta$  ротора ПА. По горизонтальной шкале вместо угла поворота ротора  $\theta$  отложены значения ослабления, устанавливаемые на шкале барабана - отсчетного устройства ПА. Эти величины связаны с  $\theta$  соотношением:

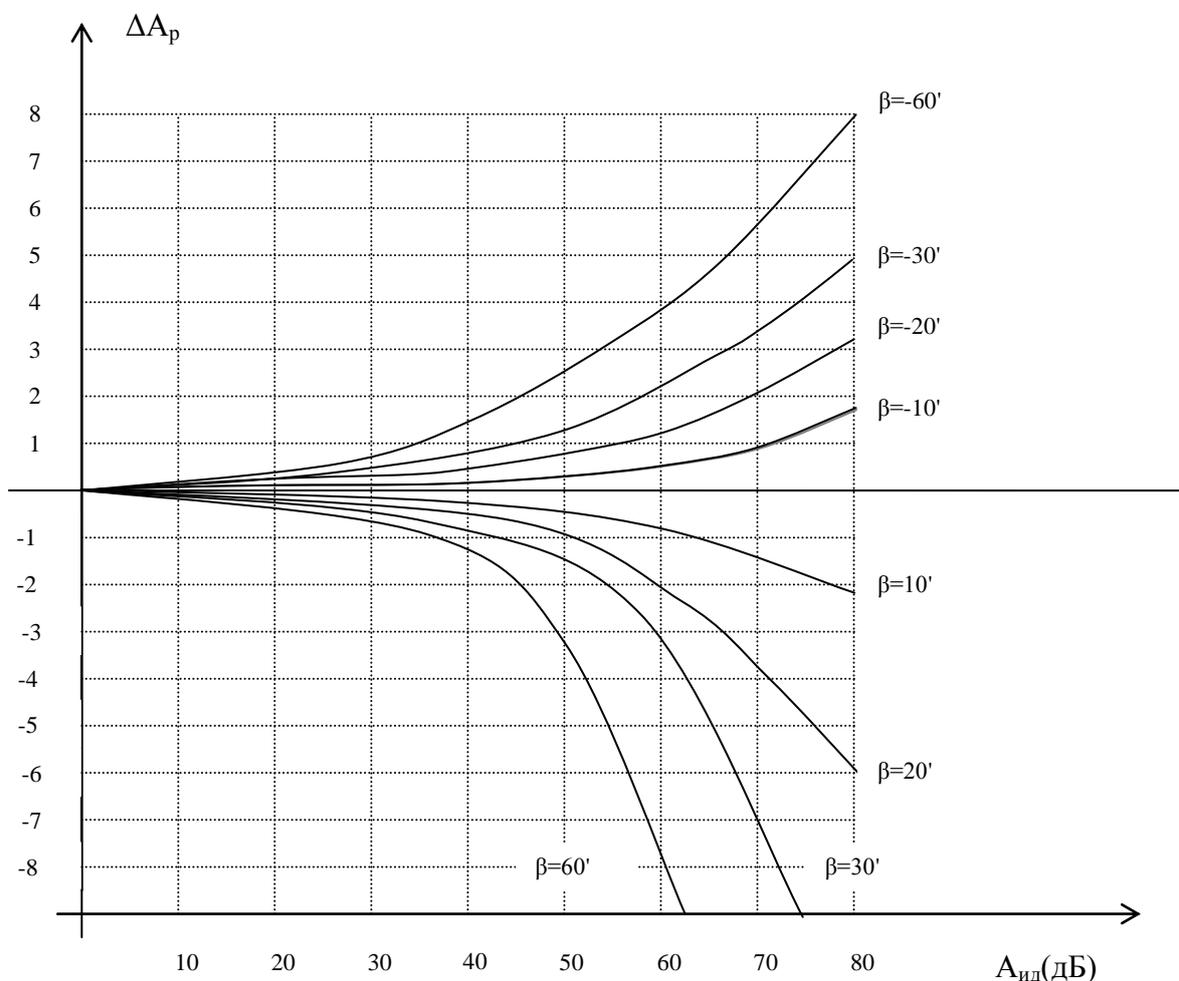
$$A_{\text{ид}} [\text{дБ}] = A_{\text{шк}} [\text{дБ}] = -40 \lg |\cos \theta|. \quad (1)$$

В таком виде график более удобен для практической оценки погрешности ослабления. По вертикальной шкале графика отложена величина

$$\Delta A_p = A_{p00} - A_{p\beta},$$

где  $A_{p00}$  – расчетное значение ослабление при отсутствии излома ротора,  $A_{p\beta}$  – при наличии излома.  $A_{p00}$  учитывает без изломов лишь "пролезание" сигнала, которое начинает сказываться при ослаблениях порядка 70 дБ ("пролезание" порядка 0,53 дБ). "Пролезание" увеличивается с увеличением ослабления, так как возрастает касательная составляющая электрического поля на резистивной пленке (при ослаблении 80 дБ "пролезание" составляет уже 1,6 дБ при данных параметрах ПА, рис.3). Кривые погрешности  $\Delta A_p$  имеют монотонно-нелинейный возрастающий характер, что объясняется также вышеописанной причиной. С увеличением излома  $\beta$  увеличивается чувствительность характеристик ПА к отклонению размеров и погрешность  $\Delta A_p$  резко нарастает.

На рис. 4 приведены кривые  $\Delta A = A_{00} - A_{\beta_1}$ , причем  $A_{00}$  – ослабление при отсутствии излома, а  $A_{\beta_1}$  – при наличии излома входного статора  $\pm\beta_1$ . Знак погрешности объясняется следующим образом: если излом статора  $+\beta_1 > 0$  (в сторону увеличения против часовой стрелки), то угол между нормальными ротора и статора уменьшается, что приводит к уменьшению ослабления проходящего сигнала, поэтому  $A_{00} > A_{\beta_1}$  и  $\Delta A > 0$ . При  $-\beta_1 < 0$  все рассуждения проводятся аналогично для противоположного направления.



**Рис. 3. Влияние излома ротора:**  
 $R_{\text{пов}} = 385 \text{ Ом/}\square$ ,  $f = 78,33 \text{ (ГГц)}$ ,  $\beta_1 = 0$ ,  $\beta_2 = 0$

Из сравнения рис. 3 и рис. 4 видно, что влияние излома ротора чуть больше, хотя и одного порядка с влиянием излома входного статора.

На рис. 5 показаны погрешности по ослаблению вследствие излома второй половины выходного статора. Ход кривых погрешности  $\Delta A = A_{00} - A_{\beta_2}$  в зависимости от  $A_{\text{ид}}$  ( $A$  шкалы) объясняется аналогично предыдущим графикам. Из рис. 5 видно, что все погрешности на порядок меньше, чем на рис. 3 и рис. 4. Это объясняется тем, что между ротором и изломом  $\beta_2$  находится первая половина выходного статора, играющая роль аттенюатора развязки.

На рис. 6 представлены кривые погрешности  $\Delta A = A_{00} - A_{\pm\beta_1 \pm \beta_2}$  совместного влияния изломов входного и выходного статоров. Из сравнения рис. 5 и рис. 6 видно, что наряду с изломом  $\beta_1$  входного статора, наличие излома  $\beta_2$  выходного статора увеличивает первоначальную погрешность (за счет  $\beta_1$ , рис. 4) на величину (за счет  $\beta_2$ ) порядка значений, изображенных на рис. 5, при условии синхронного изменения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (оба по часовой или против

часовой стрелки). В случае разного знака углов наклона погрешность, вследствие компенсации, становится немного меньше.

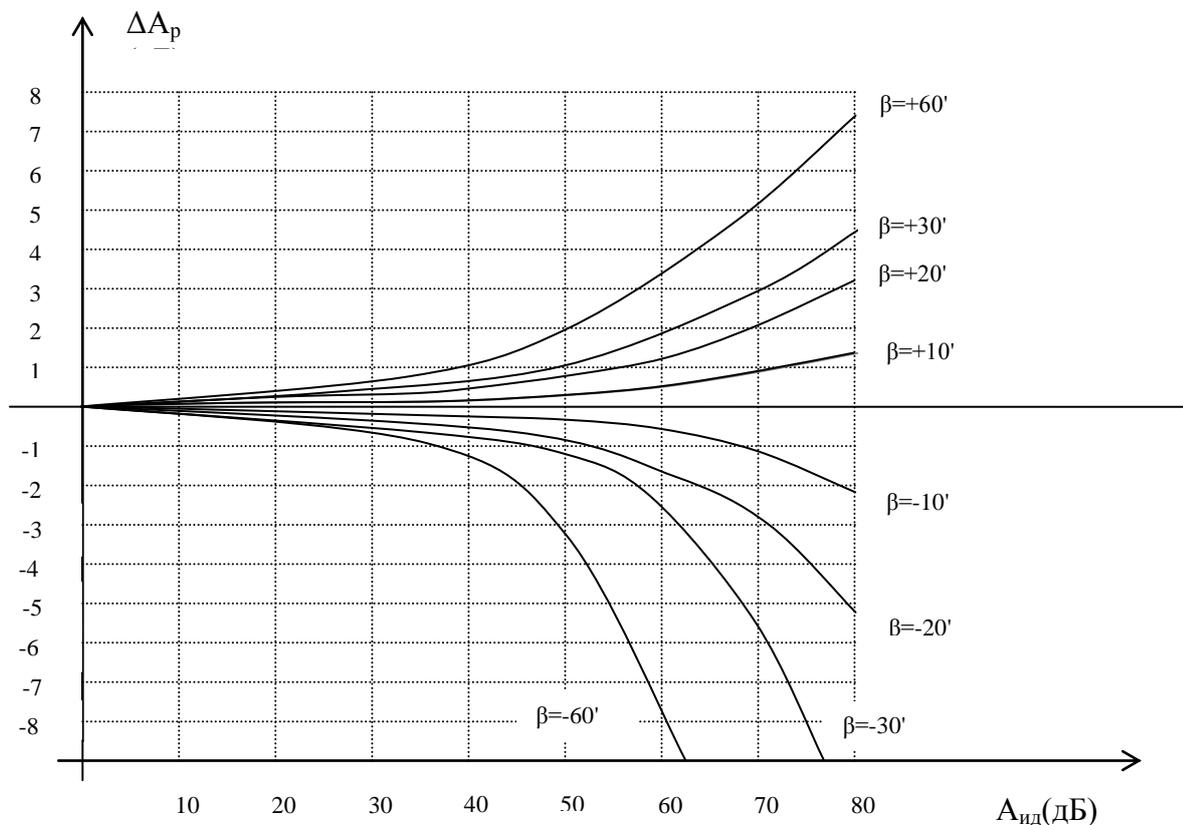
Н рис. 7 и рис. 8 приведены частотные зависимости расчетного ослабления  $A_{расч}$  в случае, когда параметром выступает поверхностное сопротивление пленки  $R_{пов}$ , которое варьируется в пределах:  $\pm 1\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  относительно поверхностного сопротивления  $R_{пов0}=385$  (Ом/  $\square$ ). Выбор 385 (Ом/  $\square$ ) для нашей экспериментальной модели сделан исходя из минимального затухания (что приводит к наибольшему  $R_{пов}$  и минимальному КСВН) для обеспечения погрешности вследствие "пролезания" сигнала не более  $\pm 1,4$  дБ на уровне 70 дБ, оцененной по приближенной формуле погрешностей вследствие неполного поглощения в пластинах аттенуатора [1]. Как видно из рисунков, с увеличением устанавливаемого по шкале ( $A_{шк}$ ) ПА ослабления (рис. 7, 8 с 50 дБ до 70 дБ), резко увеличивается погрешность ослабления:

$$\Delta A = A_{p0} - A_p,$$

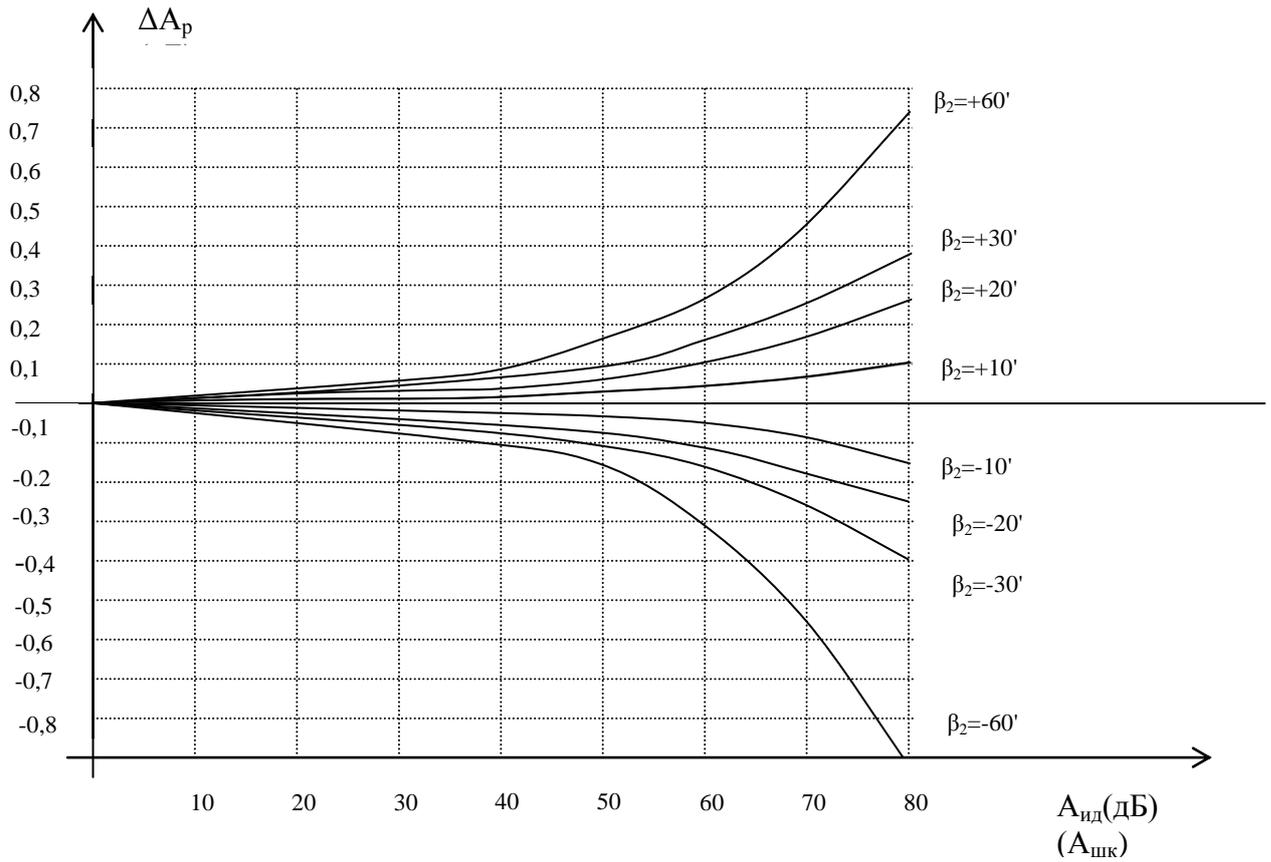
где  $A_{p0}$  – расчетное значение ослабления при  $R_{пов0}=385$  (Ом/  $\square$ ), а  $A_p$  – расчетное значение ослабления при

$$R_{пов} = R_{пов0} \pm \frac{\Delta\%}{100\%} \cdot R_{пов0},$$

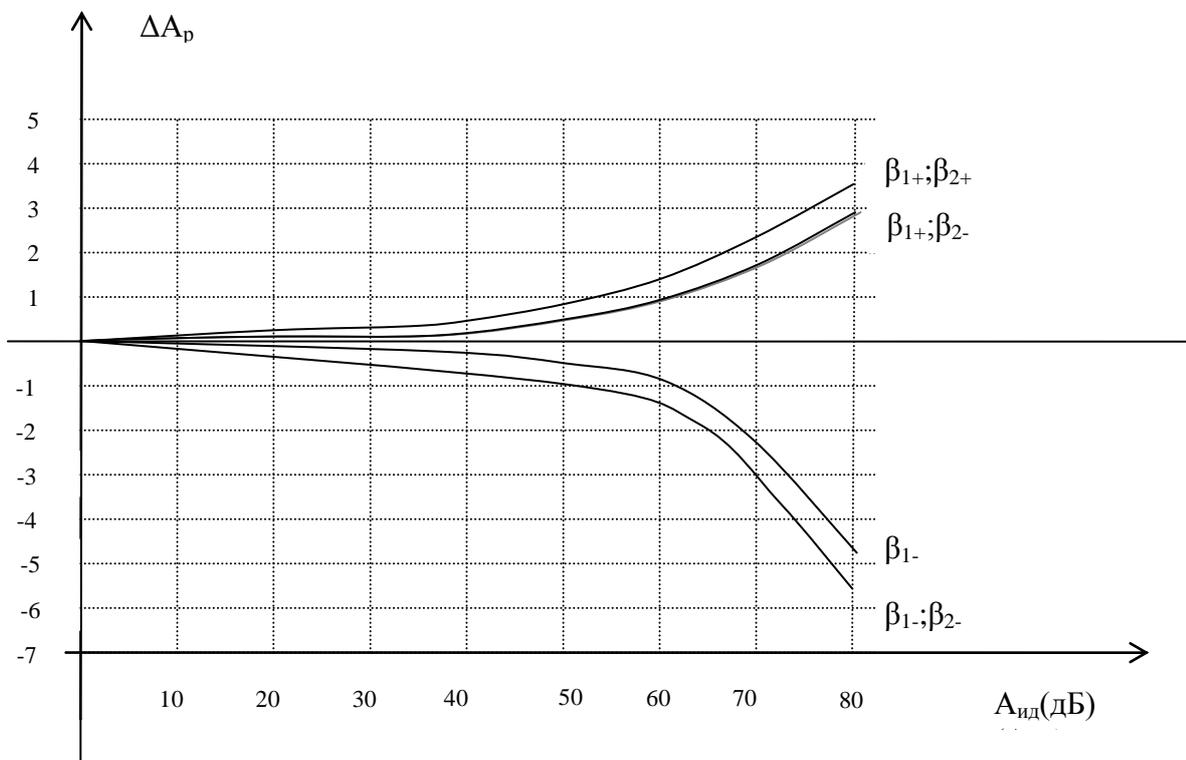
где  $\Delta\%$  - процентное отклонение величины поверхностного сопротивления. Из рисунков видно, что погрешность может быть уменьшена при уменьшении  $R_{пов}$ , однако следует заметить, что при этом увеличивается КСВН устройства.



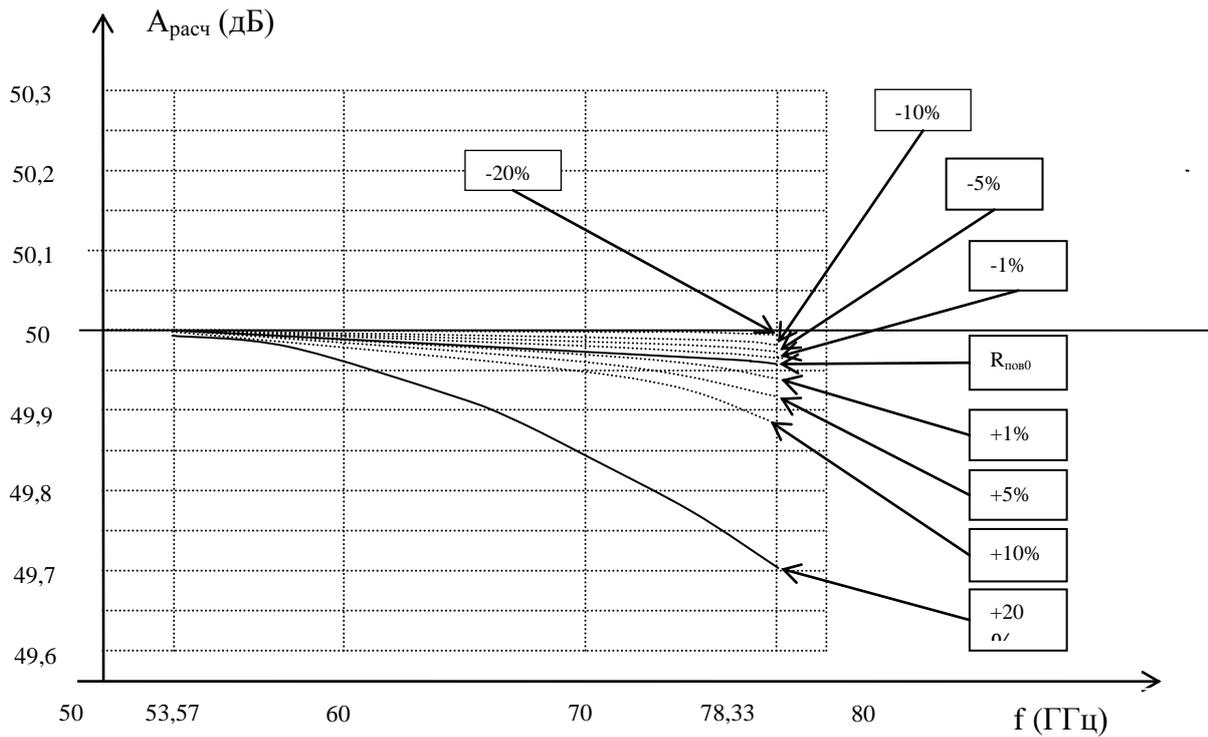
**Рис. 4. Влияние излома входного статора:**  
 $R_{пов}=385$  Ом/  $\square$ ,  $f=78,33$  (ГГц),  $\beta_2=0$ ,  $\beta=0$



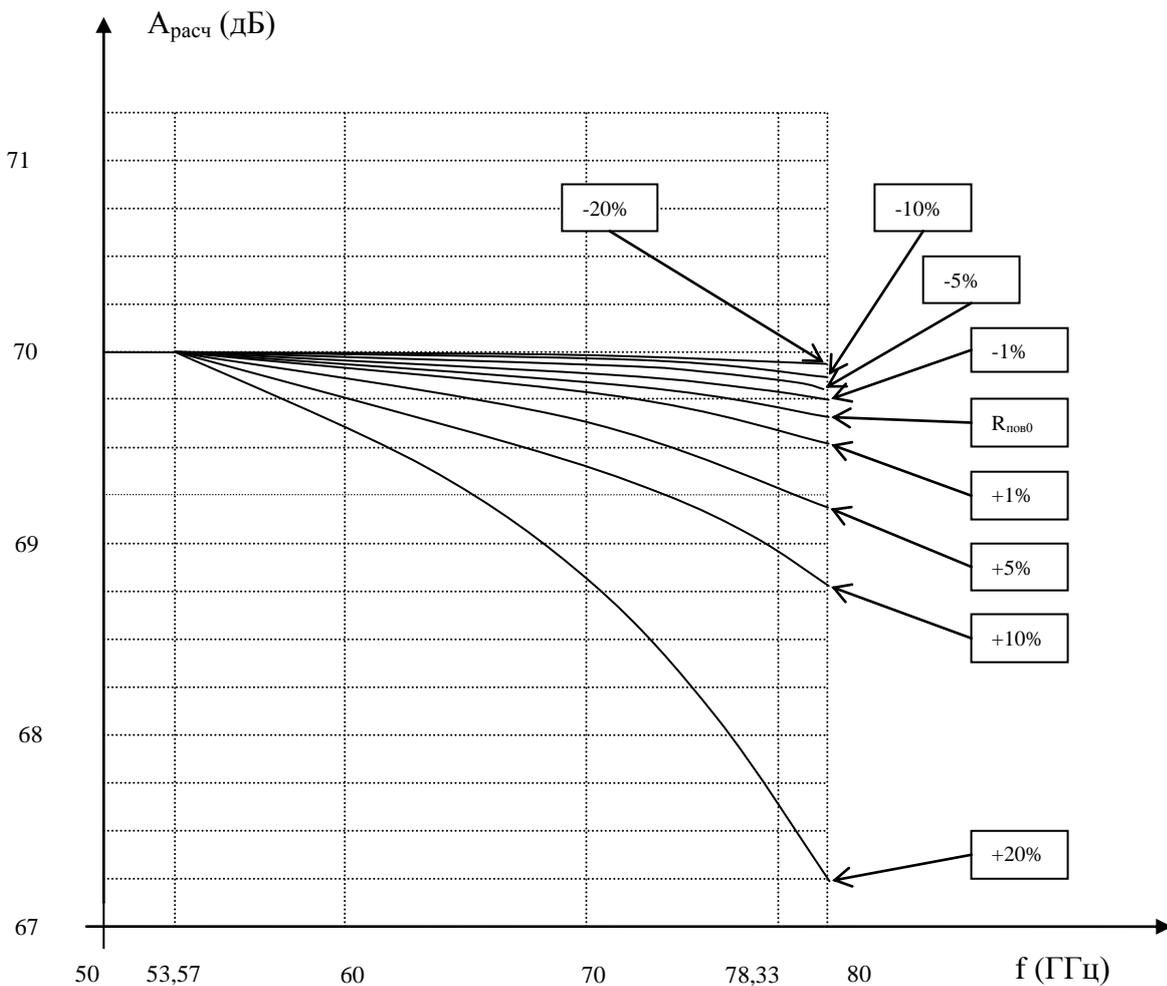
**Рис. 5. Влияние излома выходного статора:**  
 $R_{пов} = 385 \text{ (Ом/□)}$ ,  $f = 78,33 \text{ (ГГц)}$ ,  $\beta_1 = 0$ ,  $\beta = 0$



**Рис. 6. Совместное влияние изломов входного и выходного статоров:**  
 $R_{пов} = 385 \text{ Ом/□}$ ,  $f = 78,33 \text{ (ГГц)}$ ,  $\beta = 0$ ,  $\beta_{1+} = \pm 20'$ ,  $\beta_{2+} = \pm 20'$



**Рис. 7. Влияние разброса поверхностного сопротивления при  $A_{шк}=50$  (дБ):**  
 $R_{пов0}=385$  Ом/□,  $A_{шк}=50$  (дБ),  $\beta_1=0$ ,  $\beta_2=0$ ,  $\beta=0$



**Рис. 8. Влияние разброса поверхностного сопротивления при  $A_{шк}=70$  (дБ):**  
 $R_{пов0}=385$  Ом/□,  $A_{шк}=70$  (дБ),  $\beta=0$ ,  $\beta_1=0$ ,  $\beta_2=0$

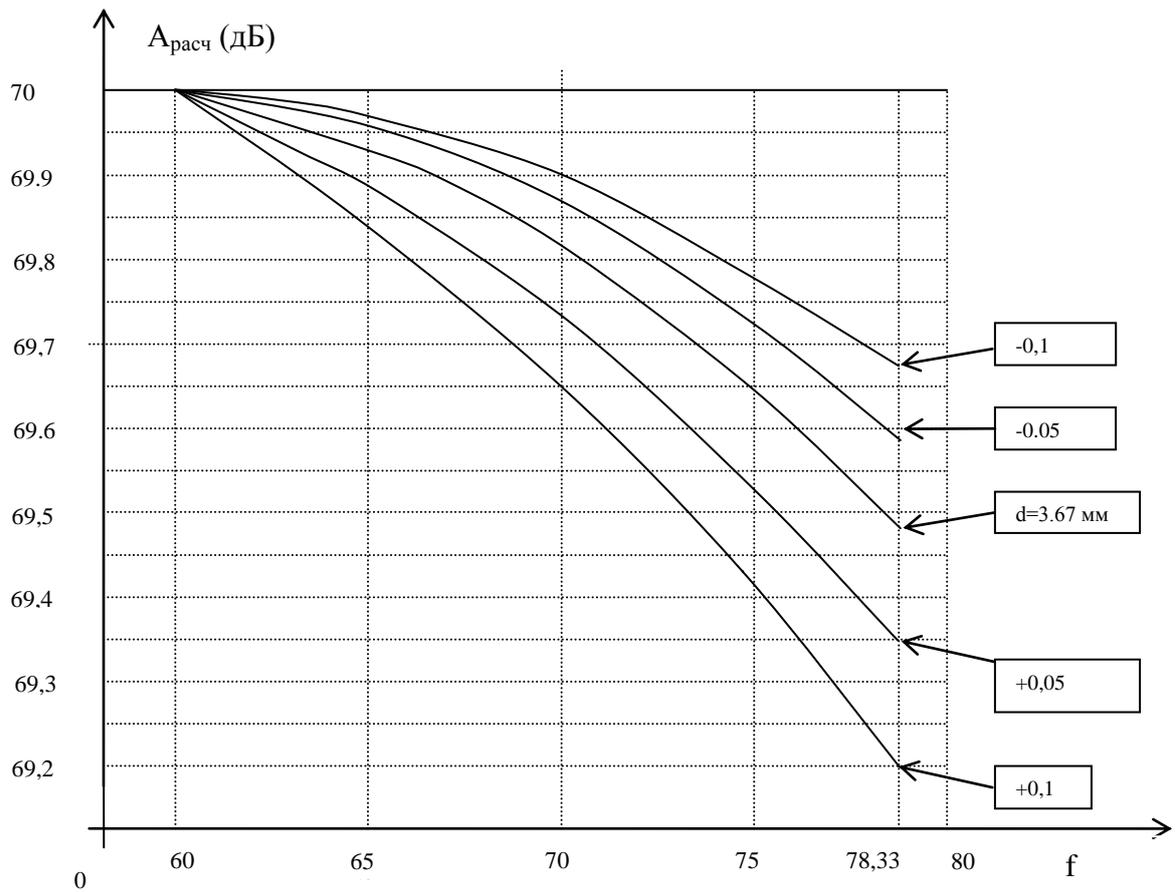


Рис. 9. Влияние диаметра  $\varnothing d$  круглого волновода на характеристики ослабления ПА:  
 $R_{пов}=385$  Ом/□,  $A_{шк}=70$  (дБ)

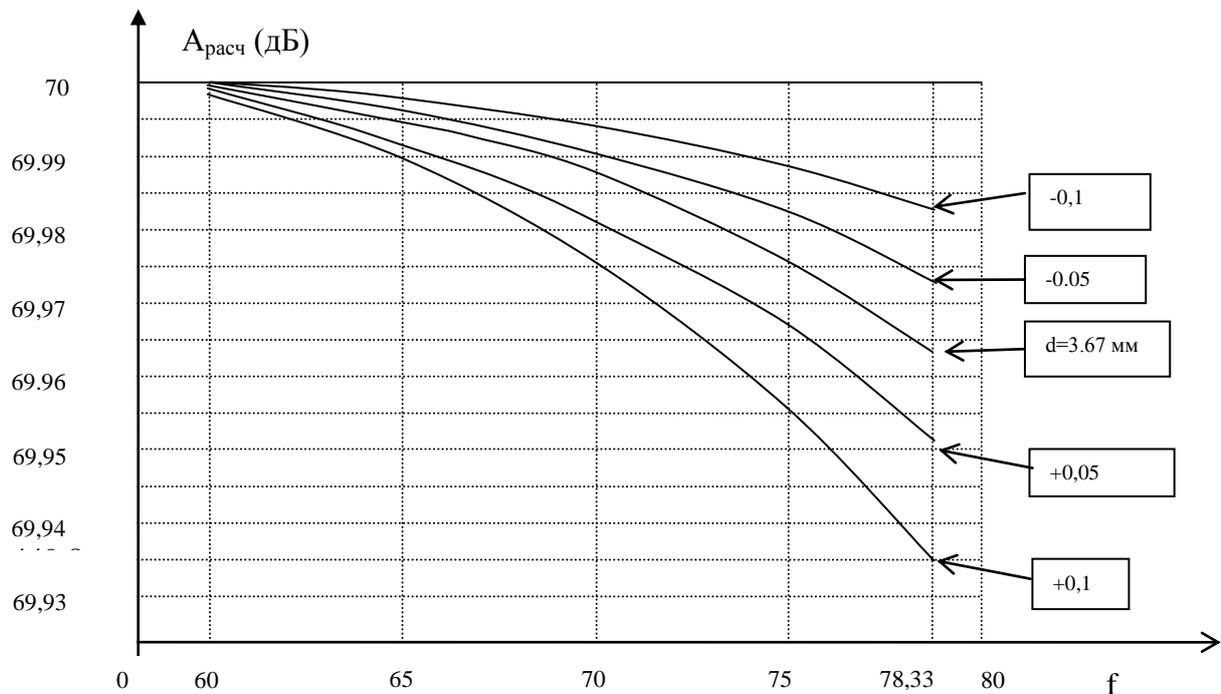


Рис. 10. Влияние диаметра  $\varnothing d$  круглого волновода на характеристики ослабления ПА:  
 $R_{пов}=308$  Ом/□,  $A_{шк}=70$  (дБ)

На рис. 9 и рис. 10 показано влияние разброса диаметра круглого волновода на характеристики ослабления ПА. Как видно из рисунков, изменение диаметра в пределах от  $-0,1$  (мм) до  $+0,1$  (мм) относительно  $d=3,67$  (мм) начинает сказываться заметно на частотах  $f \geq 60$  (ГГц) (эта область и показана на рисунках) и оказывает наиболее сильное влияние при установке шкалы ПА на верхнее пограничное значение  $A_{\text{шк}}=70$  (дБ). Из рисунков видно, что с уменьшением диаметра круглого волновода уменьшается неравномерность ослабления ПА. Однако даже при допуске  $\Delta d \pm 0,1$  (мм) погрешность из-за изменения диаметра получается  $2 \div 2,5$  раза меньше погрешности из-за «пролезания» сигнала. Уменьшение  $R_{\text{пов}}$  на 20% приводит к уменьшению неравномерности ослабления примерно на порядок как от «пролезания» сигнала, так и от разброса по диаметру, но пропорция соотношений между ними остается прежней.

### Заключение

Приведенный алгоритм расчета ПА и иллюстрируемые на его основе характеристики можно отнести к задаче анализа для учета влияния погрешностей на работу устройства. В отличие от известных численных методов конечных элементов, требующих значительных затрат машинного времени и объема памяти, данный алгоритм позволяет получить результаты расчетов практически мгновенно после запуска программы расчета. Приведенная методика позволяет значительно объективнее оценить погрешность ослабления ПА, чем приводимые в литературе оценки, вследствие учета аналитической зависимости параметров ПА. По этой же причине она позволяет определить их взаимное влияние.

### Библиографический список

1. **Калашников, В.С.** Расчет и конструирование аттенуаторов СВЧ / В.С.Калашников, А.В.Негурей. – М.: Связь, 1980. – 89 с.
2. **Томашевский, А.К.** К вопросу использования поляризационных аттенуаторов в качестве эталона ослабления Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1966. Вып. 1. С. 35–42.
3. **Иванов, А.Е.** Об учете частотной зависимости ослабления при расчете характеристик поляризационных аттенуаторов / А.Е. Иванов, О.Е. Лебедева, Г.И. Шишков // Труды докладов XVII международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии". ИСТ-2011. Н. Новгород, НГТУ. 2011.
4. **Семенов, Н.А.** Техническая электродинамика / Н.А.Семенов. – М.: Связь, 1973. – 321 с.
5. **Иванов, А.Е.** Поляризационные аттенуаторы / А.Е. Иванов, А.Е. Львов, Г.И. Шишков// Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. №4 (91). С. 11–19.
6. Устройства СВЧ и КВЧ: учебн. пособие. Ч. 1 / В.В. Бирюков [и др.]; под ред. Г.И. Шишкова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2012. – 220 с.
7. Сверхвысокочастотные устройства. Ч. 1 / В.В. Бирюков [и др.]; под ред. Г.И. Шишкова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. –182 с.

*Дата поступления  
в редакцию 16.04.2015*

A.E. Ivanov<sup>1</sup>, A.E. Lvov<sup>2</sup>, G.I. Shishkov<sup>1</sup>

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS ABSORBING RESISTIVE PLATES AND THE DIAMETERS OF THE CENTRAL WAVEGUIDES ON THE POLARIZATION ATTENUATORS WEAKING**

Nizhny novgorod state technical univercity n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod research instrument-making Institute "Quartz" n.a. A.P. Gorshkov<sup>2</sup>

**Purpose:** To describe the method of evaluating the tolerances effect on the attenuation characteristics of the polarization attenuator.

**Design/methodology/approach:** The attenuation coefficient of the waveguide paths is determined in the single – wave approximation H11. Frequency dependence is taken into account by the perturbation theory method.

**Findings:** Polarization attenuators are used in generators, spectrum analyzers, integrated measurement systems of electronic equipment. They are used also independently as a precise attenuation measures.

**Research/limitations/implications:** The given calculation can be attributed to the task of analyzing the tolerances impact on the work of the polarization attenuator. It can be used as the starting point in the problem of parametric and structural synthesis of polarization attenuators on the basis of predetermined characteristics.

**Originality/value:** Programs based on the finite element method require a lot of computer time. In contrast, this algorithm allows to obtain results almost instantly after starting the calculation program. This technique allows to evaluate more objectively the effect of tolerances on the attenuation due to analytical connection parameters and to determine their mutual influence.

*Key words:* polarization attenuato.