

КОМПЕНСАЦИЯ ВНОСИМЫХ ПОТЕРЬ В РЕЗОНАТОРАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ С АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Введение

Измерительные преобразователи, основой которых являются микроволновые резонаторы, позволяют производить высокочувствительные измерения самых различных параметров и характеристик [1]. Изменения измеряемых параметров при этом связываются с изменениями резонансной частоты и добротности резонаторного измерительного преобразователя (РИП). Чем выше добротность резонатора, тем более высокая точность и чувствительность достигаются при измерениях. Для этого обычно стараются конструкцию резонатора и вид колебаний подбирать таким образом, чтобы обеспечить максимальную собственную добротность. Однако в результате взаимодействия электромагнитных полей резонатора либо непосредственно с тестируемым объектом, либо посредством элементов связи, добротность РИП, особенно в случае тестирования объектов с изначально высокими потерями, значительно уменьшается, что ведет к уменьшению чувствительности и точности при измерении соответствующих изменений. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможности компенсации или ослабления влияния указанных факторов.

В работе [2] предлагается эту проблему решать с помощью использования так называемых активных резонаторов бегущей волны (АРБВ), представляющих из себя схему кольцевого резонатора бегущей волны, в которую кроме чувствительного измерительного резонатора включены дополнительные элементы, обеспечивающие однонаправленное распространение волны и дополнительное ее усиление с целью компенсации потерь, вносимых измерительным резонатором. При этом в основном анализируются режимы работы и характеристики сигналов измерительной схемы, частью которой является АРБВ, подключаемый с помощью направленного ответвителя, и мало уделено внимания собственно резонатору бегущей волны и режимам его функционирования при различных схемных решениях.

Целью данной работы является анализ характера изменения АЧХ составного кольцевого резонатора бегущей волны (РБВ) в зависимости от параметров элементов, включаемых в его схему.

Основная часть

На практике кольцевые резонаторы бегущей волны выполняются чаще всего на основе волноводов прямоугольного сечения, подключенных к основному тракту с помощью направленного ответвителя. Поскольку в дальнейшем будут рассматриваться процессы, происходящие в самом кольце, далее будем рассматривать прямоугольный волновод, свернутый в виде кольца и замкнутый сам на себя. Допустим, что в некотором сечении АА возбуждается волна, распространяющаяся только в одном направлении. Тогда при средней длине кольца L , составляющей целое число длин волн λ_g в рассматриваемой линии, должно происходить синфазное сложение бегущих волн и, следовательно, резкое увеличение напряженностей электрического и магнитного полей. Это является одним из признаков резонанса, типичным для всех полых резонаторов [3].

В режиме установившихся гармонических колебаний в однородной передающей линии бегущая волна может быть описана соотношением:

$$E = E_m \cdot e^{-\gamma z} \cdot e^{j\omega t} = E_m \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (1)$$

где E_m – напряженность электрической составляющей поля бегущей волны; $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения; α – постоянная затухания; $\beta = 2\pi/\lambda_g$ – фазовая постоянная;

λ_g – длина волны в линии (для прямоугольного волновода на волне H_{10} – $\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$, где λ – длина волны в свободном пространстве; a – размер широкой стенки волновода); z – протяженность линии.

Для бегущей волны в линии, переходя к тригонометрическим функциям, можно записать следующее выражение

$$E = E_m \cdot e^{-\alpha l} \cdot \cos(\omega_0 t - \beta l), \quad (2)$$

где l – длина линии или кольцевого резонатора.

Условие резонанса для РБВ – $l = n \cdot \lambda_g$, где n – целое число.

Задавая резонансную частоту, размеры линии передачи (в нашем случае прямоугольного волновода) и вид колебаний, можно рассчитать резонансную длину волны РБВ. Для волновода сечением 23×10 мм, типа волны H_{10} , частоты 10 ГГц получим:

$$\lambda_{g0} = \frac{c}{f_0 \cdot \sqrt{1 - (c/2af)^2}} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{10} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 23 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{10}} \right)^2}} = 0,04. \quad (3)$$

Из практических соображений величину n можно выбрать равной 10, тогда длина РБВ будет 0,4 м.

Поскольку условием резонанса является синфазное сложение волн в любом сечении линии при многократном прохождении волны, то будет происходить суммирование по k , где k – количество суммируемых волн.

Зависимость напряженности поля в кольце от частоты генератора для единичной амплитуды исходной волны может быть представлена в следующем виде:

$$E(f) = \sum_k e^{-\alpha k l} \cos\left(\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)}\right), \quad (4)$$

где $\lambda_g(f) = c / f \cdot \sqrt{1 - (c/2af)^2}$.

Зависимость для мощности может быть представлена следующим образом:

$$P(f) = \sum_k e^{-2\alpha k l} \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)}\right). \quad (5)$$

Величина k находится из отношения

$$k = \frac{P_{ex}}{P_{ex} - P_{вых}}. \quad (6)$$

Соотношение величин P_{ex} и $P_{вых}$ может быть оценено из следующего соотношения:

$$10 \lg\left(\frac{P_{ex}}{P_{вых}}\right) = 8,68 \cdot 2 \cdot \alpha \cdot l, \quad (7)$$

где $8,68 \cdot 2 \cdot \alpha$ – величина погонного затухания на единицу длины линии, из которой изготовлен кольцевой РБВ (для стандартного прямоугольного волновода (23×10 мм) эта величина составляет 0,143 дБ/м [3]).

Пользуясь выражениями (6) и (7) получим в этом случае величину $k \approx 31$. График амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) РБВ для выбранных параметров волновода и

длины РБВ, построенный с использованием соотношения (5), приведен на рис.1. На рис.2 приведена зависимость добротности кольцевого РБВ от величины погонного затухания α (неп/мм).

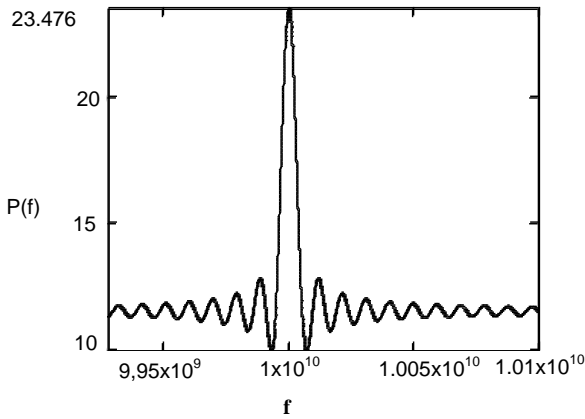


Рис.1. АЧХ кольцевого волноводного РБВ

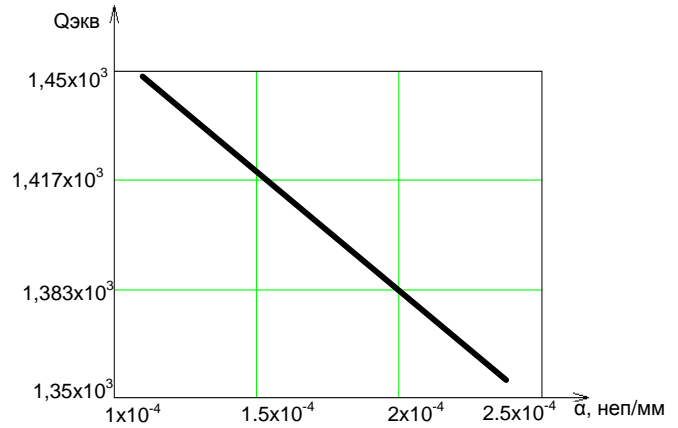


Рис.2. Зависимость Q РБВ от α

Рассмотрим теперь схему кольцевого волноводного РБВ, в которую включен на проход резонансный измерительный преобразователь (РИП) (рис.3).

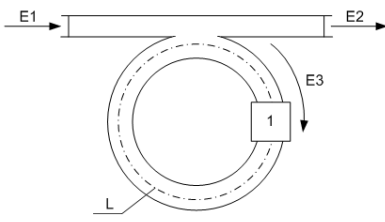


Рис.3. Кольцевой волноводный РБВ с РИП (1), включенным на проход

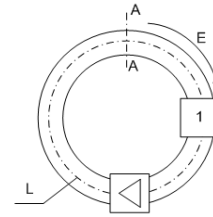
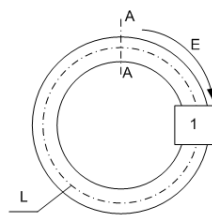


Рис. 4. РБВ с РИП и резонансным усилителем

Уравнение резонансной кривой колебательного контура обычно записывается в следующем виде:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1+a^2}}, \quad (8)$$

где $a = Q_n(f/f_p - f_p/f) \approx 2\Delta f Q_n / f_p$ – обобщенная расстройка; f – частота измерительного генератора; Δf – отклонение частоты измерительного генератора f от резонансной частоты f_p .

Коэффициент передачи проходного резонатора с учетом коэффициентов связи:

$$K_p = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \frac{1}{\sqrt{1+a^2}}, \quad (9)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты связи ($\beta_i = Q_0 / Q_{внi} = \overline{P_{внi}} / P_p$); Q_0 – собственная добротность резонатора; $Q_{внi}$ – внешняя добротность; $\overline{P_{внi}}$ – средняя мощность потерь в соответствующем элементе связи или мощность, излучаемая из резонатора через соответствующий эле-

мент связи при выключенном источнике сигнала; $\overline{P_p}$ – средняя мощность потерь собственно в резонаторе.

С учётом коэффициента передачи проходного резонатора, выражение для АЧХ примет вид:

$$E(f) = \sum_k e^{-\alpha k} \cdot \left[\frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \right]^k \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right]^2}} \right]^k \times \cos \left[\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)} + k \cdot \arctg \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right] \right]. \quad (10)$$

По мощности выражение для АЧХ запишется следующим образом:

$$P(f) = \sum_k e^{-2\alpha k} \cdot \left[\frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \right]^k \cdot \left[\frac{1}{1 + \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right]^2} \right]^k \times \cos^2 \left[\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)} + k \cdot \arctg \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right] \right]. \quad (11)$$

Величина k в этом случае может быть определена с учетом формулы (6) и следующего соотношения:

$$10 \lg \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} \right) = 8,68 \cdot 2 \cdot \alpha \cdot l + 10 \lg \left(\frac{(1+\beta_1+\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} \right). \quad (12)$$

Анализ выражений (6) и (12) показывает, что при включении РИП в кольцо РБВ величина k значительно уменьшается (до нескольких единиц и менее) и может быть увеличена только при больших значениях коэффициентов связи (рис.5). Увеличение коэффициентов связи ведет к росту эквивалентной добротности схемы РБВ с РИП в целом (рис.5, рис.6) и в тоже время к деградации резонансных свойств собственно РИП и, соответственно, такое схемное решение не может быть использовано на практике.

Затухание, вносимое в схему РБВ в результате включения РИП, может быть скомпенсировано включением в цепь РБВ дополнительного усилителя.

Рассмотрим схему РБВ с РИП, в которую дополнительно включен резонансный усилитель (рис.4).

В данном случае, характеристика резонансного усилителя представляется в виде характеристики одиночного колебательного контура, с коэффициентом передачи на резонансной частоте равным K_p .

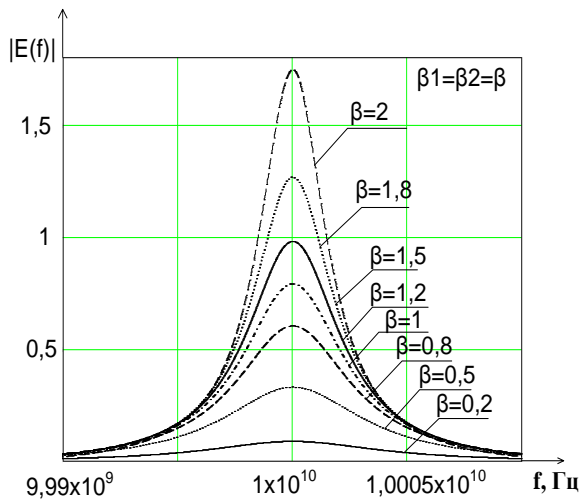


Рис.5. Зависимость АЧХ РБВ с РИП от β

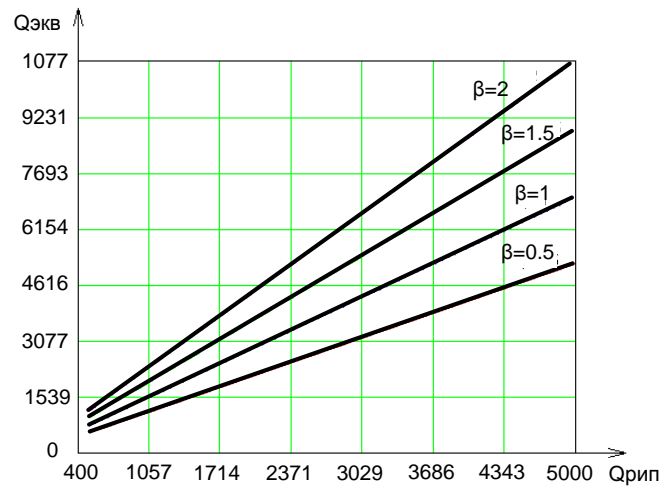


Рис. 6. Зависимость $Q_{экв}$ РБВ с РИП от $Q_{РИП}$ при различных β

АЧХ такой системы может быть представлена выражением [4]:

$$E(f) = \sum_k e^{-\alpha k} \cdot \left[\frac{K_p}{\sqrt{1 + \left[\frac{(f-f_0)}{\Delta f_c} \right]^2}} \right]^k \cdot \left[\frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \right]^k \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right]^2}} \right]^k \times \cos \left[\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)} + k \cdot \arctg \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right] + k \cdot \arctg \left[\frac{(f-f_0)}{\Delta f_{yc}} \right] \right] \quad (13)$$

где K_p – коэффициент усиления резонансного усилителя; Δf_{yc} – полоса пропускания резонансного усилителя.

По мощности выражение для АЧХ запишется следующим образом:

$$P(f) = \sum_k e^{-2\alpha k} \cdot \left[\frac{K_p}{1 + \left[\frac{(f-f_0)}{\Delta f_{yc}} \right]^2} \right]^k \cdot \left[\frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \right]^k \cdot \left[\frac{1}{1 + \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right]^2} \right]^k \times \cos^2 \left[\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)} + k \cdot \arctg \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right] + k \cdot \arctg \left[\frac{(f-f_0)}{\Delta f_{yc}} \right] \right] \quad (14)$$

Величина k в этом случае может быть определена с учетом формулы (6) и следующего соотношения:

$$10 \lg \left(\frac{P_{ex}}{P_{вх}} \right) = 8,68 \cdot 2 \cdot \alpha \cdot l + 10 \lg \left(\frac{(1+\beta_1+\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} \right) + 10 \lg \left(\frac{1}{K_p} \right) \quad (15)$$

Графики АЧХ, построенные с учетом (13) приведены на рис. 7 и рис. 8. На рис. 9 приведены зависимости величины эквивалентной добротности АРБВ от добротности РИП и параметров резонансного усилителя (полосы пропускания и коэффициента усиления).

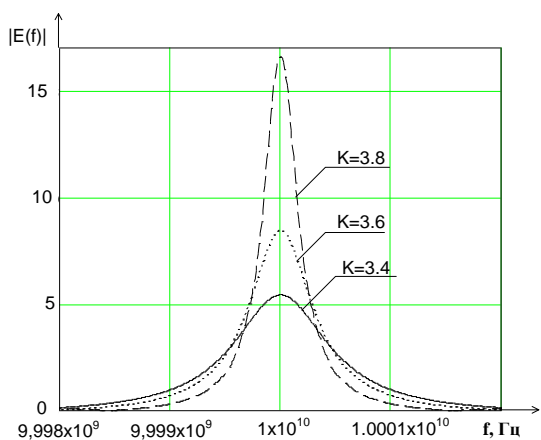


Рис.7. Зависимость АЧХ АРБВ от К резонансного усилителя

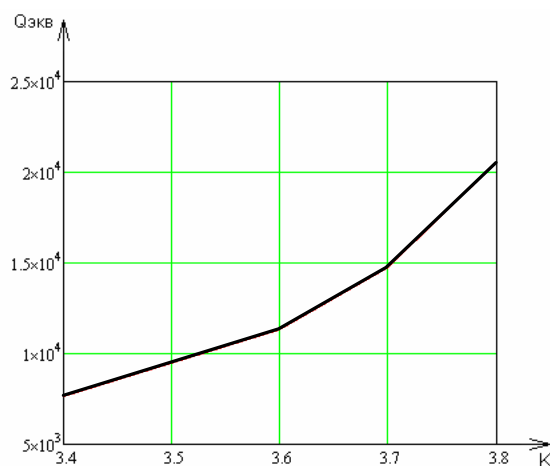
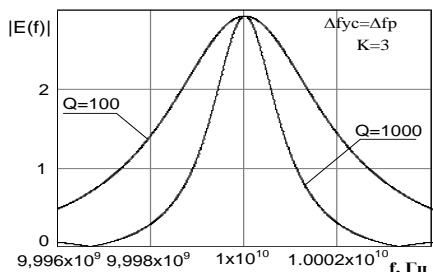
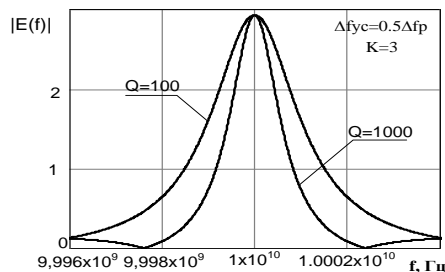


Рис.8. Зависимость $Q_{экв}$ от К резонансного усилителя

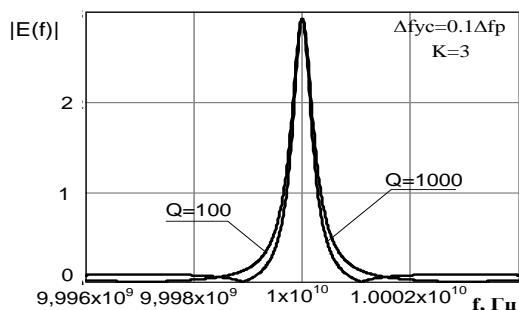
Видно, что с ростом коэффициента усиления резонансного усилителя растет и эквивалентная добротность АРБВ (рис.7, рис.8), но, в тоже время (рис.9), при полосе пропускания резонансного усилителя равной или меньшей полосы пропускания РИП эквивалентная добротность АРБВ будет в большей степени определяться характеристиками усилителя, а не характеристиками РИП.



а)



б)



в)

Рис.9. Зависимости формы АЧХ АРБВ от полосы пропускания резонансного усилителя при $Q_{РИП} = 10^2$ и $Q_{РИП} = 10^3$

Для ослабления влияния характеристик резонансного усилителя на АЧХ АРБВ и сохранения более сильной связи характеристик РИП и АРБВ предпочтительным представляется использование в схеме РБВ нерезонансного усилителя.

В этом случае АЧХ РБВ может быть представлена выражением [4]:

$$E(f) = \sum_k e^{-\alpha k} \cdot (K)^k \cdot \left[\frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \right]^k \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right]^2}} \right]^k \times \cos \left[\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)} + k \cdot \arctg \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right] + k \cdot \varphi_{yc} \right]. \quad (16)$$

где φ_{yc} – сдвиг фазы сигнала в усилителе (в идеальном случае $\varphi_{yc} = 2\pi f\tau$, где τ – время задержки сигнала в усилителе).

По мощности выражение для АЧХ запишется следующим образом:

$$P(f) = \sum_k e^{-2\alpha k} \cdot (K)^k \cdot \left[\frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \right]^k \cdot \left[\frac{1}{1 + \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right]^2} \right]^k \times \cos^2 \left[\frac{2\pi k l}{\lambda_g(f)} + k \cdot \arctg \left[\frac{2Q_H(f-f_0)}{f_0} \right] + k \cdot \varphi_{yc} \right]. \quad (17)$$

Величина k при этом также определяется с помощью соотношений (6) и (15), как и в предыдущем случае.

Графики АЧХ АРБВ для данного случая приведены на рис. 10 и рис. 11.

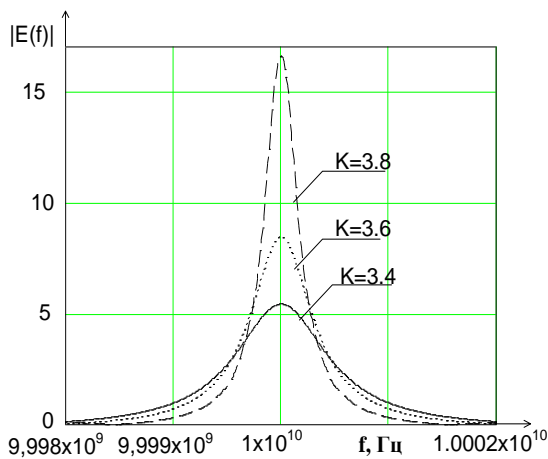


Рис.10. Зависимость АЧХ АРБВ от K нерезонансного усилителя при $\varphi_{yc} = 0$

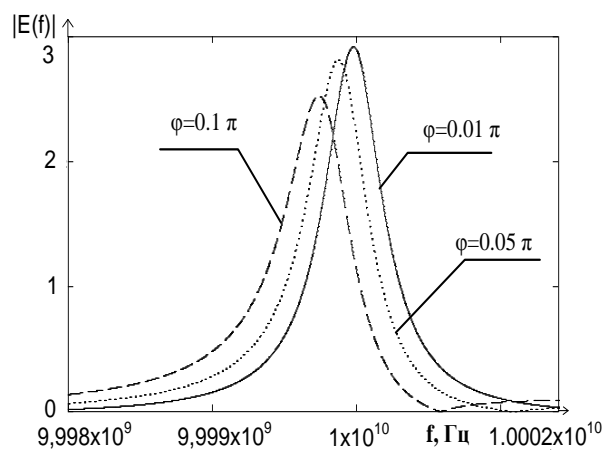


Рис.11. Зависимость АЧХ АРБВ от различных величин набега фазы в нерезонансном усилителе

Характер изменения формы АЧХ АРБВ при росте коэффициента усиления нерезонансного усилителя подтверждает увеличение эквивалентной добротности АРБВ с увеличением коэффициента усиления. При этом влияние параметров РИП на эквивалентную характеристику остается определяющим. Однако следует отметить, что фазовый сдвиг сигнала в нерезонансном усилителе приводит к смещению значения центральной частоты АЧХ АРБВ и снижению эквивалентной добротности за счет нарушения фазовых условий резонанса РБВ. Этот фактор может быть существенно снижен и даже полностью скомпенсирован с помощью специального перестраиваемого компенсирующего фазовращателя, включаемого в кольцевую цепь составного АРБВ.

В случае превышения коэффициентом усиления некоторого критического значения схема АРБВ как с резонансным, так и с нерезонансным усилителем самовозбуждается и переходит в осцилляторный режим, а АЧХ превращается в спектр частот генерации, ширина которого определяется характеристиками используемого усилителя.

Выводы

Рассмотрены и проанализированы характеристики волноводных резонаторов бегущей волны при включении в их кольцевую цепь таких элементов как резонансные измерительные преобразователи с разными вносимыми потерями, узкополосных и широкополосных усилителей с разными коэффициентами усиления и полосами усиливаемых частот. Оценены возможности компенсации потерь, вносимых резонансными преобразователями, при сохранении их заметного влияния на АЧХ РБВ с активными элементами.

Проведенные исследования доказывают возможность создания на основе АРБВ устройств, позволяющих компенсировать статические потери, вносимые в РИП исследуемым образцом или чувствительным элементом, при сохранении и увеличении чувствительности к изменениям измеряемых величин.

Список литературы: 1. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P. et al.* Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd., 2004. - 537p. 2. *Сафонов В.В.* Микроволновые устройства с активными резонаторами. Дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровск, 2007. – 186с. 3. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. т.1. М.: Высш. школа. 1970. – 440с. 4. *Бондаренко И.Н., Ткаченко О.Н.* Компенсационные свойства резонаторов бегущей волны с активными элементами. Материалы 19 Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 2009, с. 795-796.