

**ВКЛАД КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С КООКСИАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АПЕРТУРОЙ****Введение**

Резонаторные измерительные преобразователи с коаксиальной измерительной апертурой (РИП КИА) находят широкое применение в микроволновой сканирующей микроскопии (МСМС) и СВЧ влагометрии [1 – 3]. В каждой из этих областей оптимальное проектирование таких преобразователей связано с различными критериями, однако практика показала, что необходимость учета излучательных потерь имеет место в обоих случаях.

Обычно при моделировании характеристик резонаторных измерительных преобразователей (РИП) исходят из колебательного характера электромагнитного поля в резонаторе и воздействующем на него объекте. Для закрытых (неизлучающих) систем это вполне допустимо. Однако в РИП КИА воздействие объекта на поле резонатора изменяет излучательные свойства измерительной апертуры. Так, в случае идеального четвертьволнового коаксиального РИП излучение через открытый торец в свободное пространство отсутствует.

Внесение в область апертуры объекта (рис. 1) изменяет условия на открытом торце резонатора и появляется не только «выход» поля резонансного колебания в объект, но и волновое излучение в него. Для теоретического исследования такого РИП необходимо находить полное распределение электромагнитного поля в резонаторе и объекте из решения уравнений Максвелла. Вклад излучательной компоненты в изменение добротности РИП при воздействии объекта зависит от электродинамических свойств объекта и геометрии апертуры. При общей постановке решения такой задачи невозможно разделить указанные аспекты (излучательные и колебательные потери).

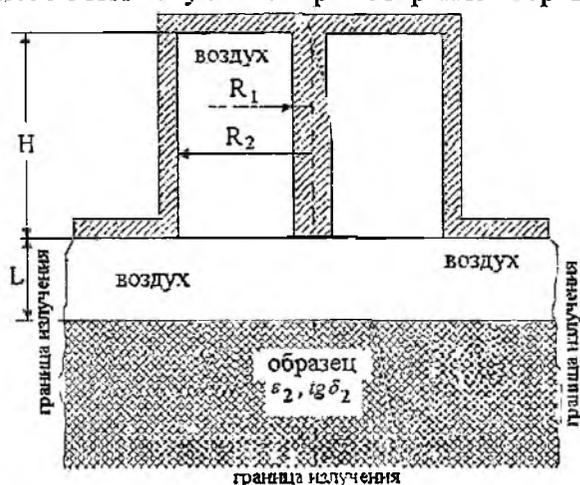


Рис. 1. Четвертьволновый коаксиальный РИП

**Физические предпосылки моделирования РИП КИА**

Рассмотрим схематическую модель коаксиального РИП с параметрами (рис. 1):

$$H/\lambda = 2,75, R_2/\lambda = 0,1, R_1/\lambda = 0,01,$$

где  $\lambda$  – длина волны СВЧ колебания.

В зависимости от выбора рабочей частоты подобный РИП является основой резонаторного микрозонда в МСМС, применим в методе влагометрии для определения влагосодержания в биологических средах и др.

На рис. 2 показаны результаты численного исследования добротности коаксиального РИП при выборе рабочей частоты в окрестности  $f_0 = 1,3$  ГГц и наличии воздушного зазора  $L$  между преобразователем и образцом. Добротность при этом определялась из частотной зависимости параметра  $S_{11}$ , вычисленной с использованием прямых численных методов решения уравнений Максвелла для распределения поля, основанных на методе конечных элементов [4, 5] без учета активных потерь в стенках резонатора.

Графики иллюстрируют сильное влияние величины зазора  $L$  и относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2$  объекта контроля на величину добротности. При этом влияние тангенса относительных диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta_2$  оказывается небольшим.

Добротность исходного РИП ограничена реальными потерями на излучение из открытого торца ( $Q_0=3250$ ).

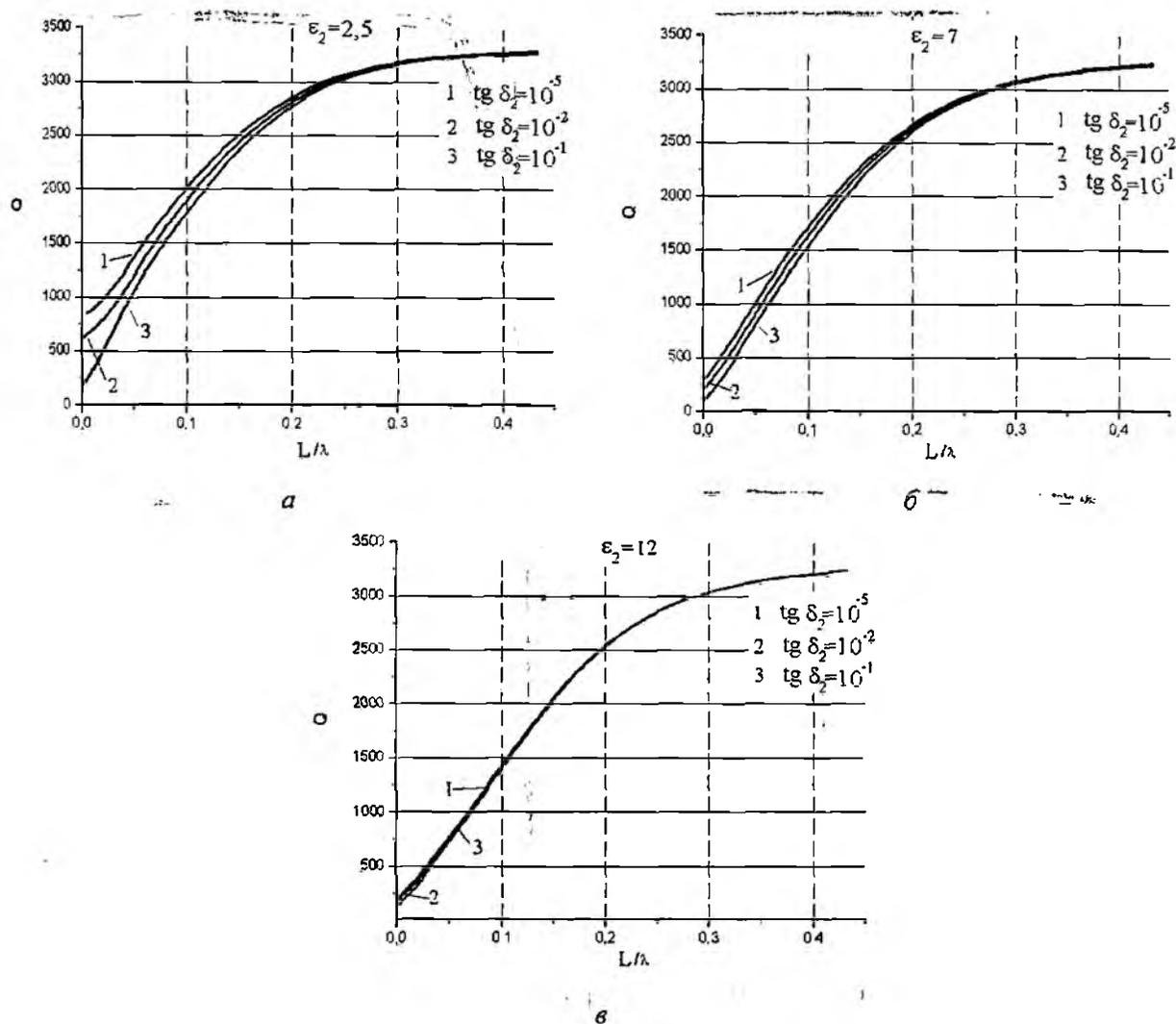


Рис. 2. Зависимость добротности от величины зазора при различных параметрах объекта контроля

### Влияние излучательных потерь на параметры РИП КИА

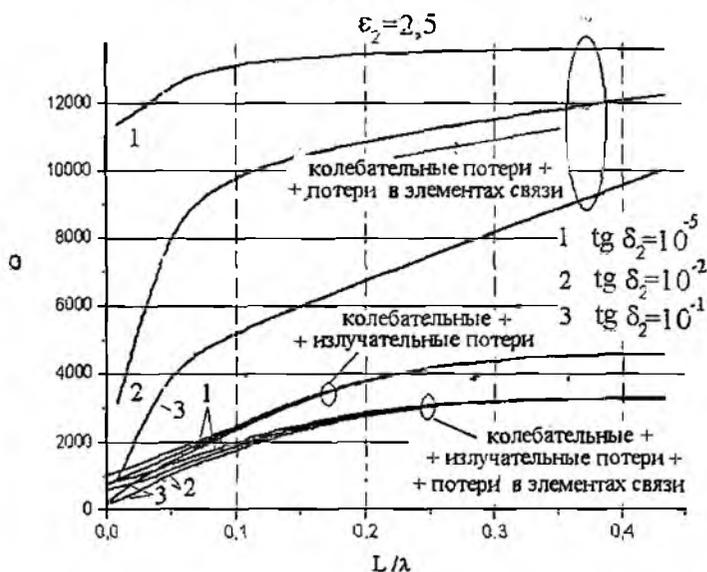


Рис.3. Зависимость добротности от величины зазора

Существенный вклад излучательных потерь подтверждается сравнением с аналогичными зависимостями, полученными из решения волнового уравнения без учета активных потерь в стенках резонатора (рис. 3).

Обратим внимание на то, что при вполне физическом объяснении зависимости резонансной частоты от величины зазора  $L$  и  $\epsilon_2$  объекта контроля (рис. 4), полученной без учета активных потерь в стенках резонатора, зависимость от  $\text{tg} \delta_2$  при  $\epsilon_2 = 2,5$  и  $\epsilon_2 = 7$  не вполне объяснима.

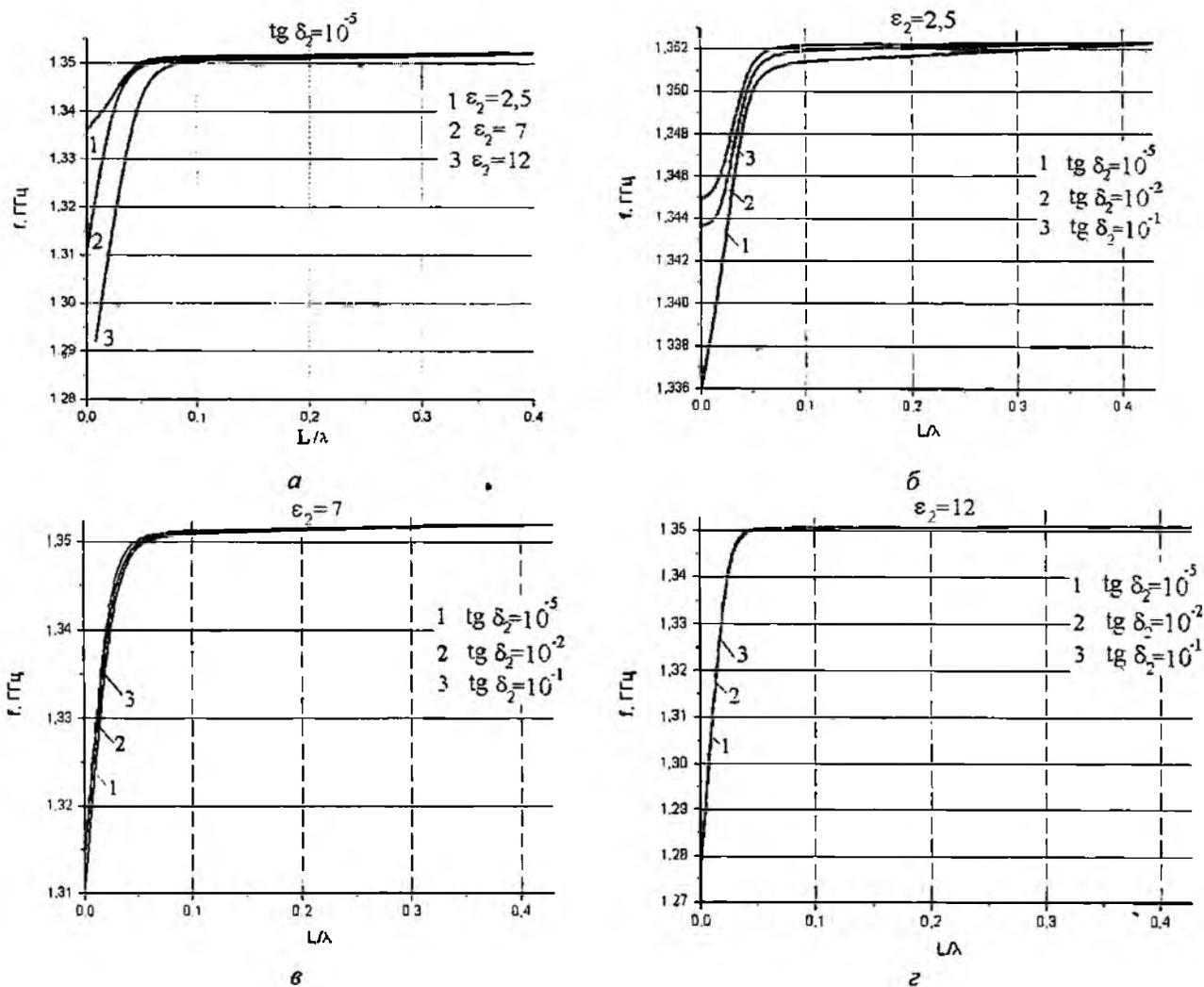


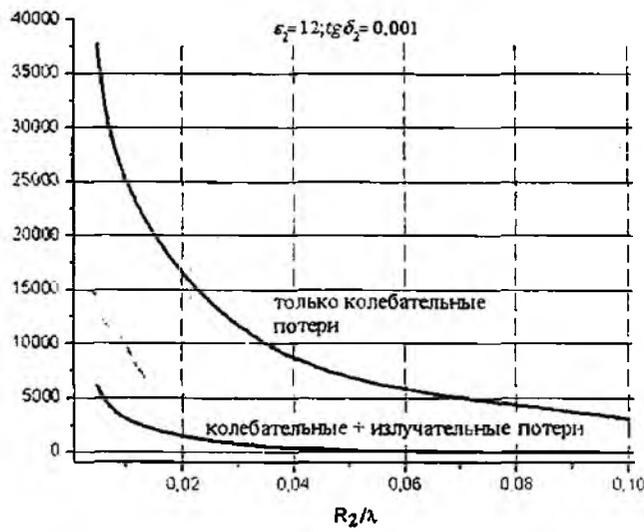
Рис. 4. Зависимость частоты от величины зазора при различных параметрах объекта контроля

На графиках отчетливо просматривается нивелирование зависимости частоты от величины зазора при  $L/\lambda > 0,1$ , в отличие от графика изменения добротности. Этот факт обусловлен учетом излучательных потерь в зазор.

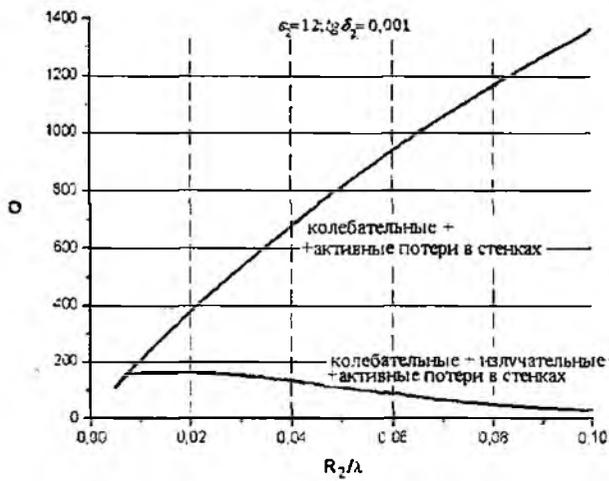
В целом эти результаты свидетельствуют о влиянии излучения из открытого торца четвертьволнового коаксиального РИП на его характеристики. Зависимости, представленные на рис. 5 показывают, что с уменьшением величины апертуры  $R_2/\lambda$ , влияние излучения уменьшается для РИП КИА с  $R_1/R_2 = 0,3$  как без учета потерь в стенках резонатора (рис. 5, а), так и с учетом последних (рис. 5, б, в).

Качественно различие кривых без учета потерь в стенках резонатора и с их учетом обуславливается доминированием разных типов потерь при различных соотношениях  $R_2/\lambda$ .

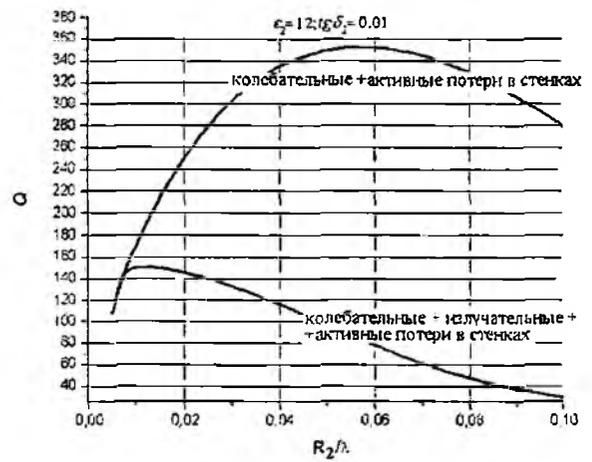
С использованием прямого численного метода решения волнового уравнения были построены зависимости добротности от  $R_1/R_2$ , при разных раскрывах апертуры без учета потерь в стенках резонатора (рис. 6, а) и с учетом последних (рис. 6, б – д).



a

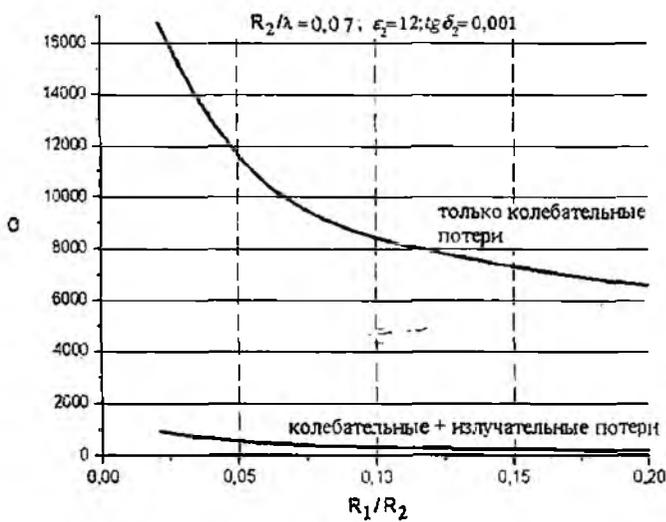


б

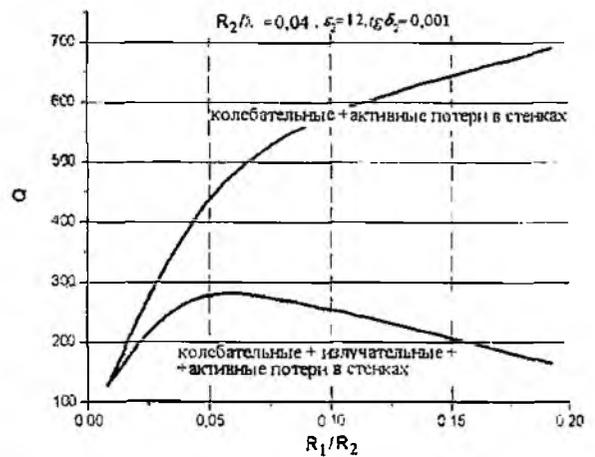


в

Рис. 5. Зависимость добротности от величины измерительной апертуры

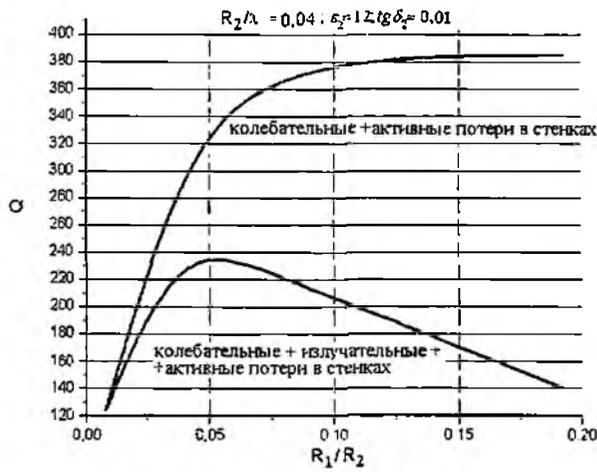


a

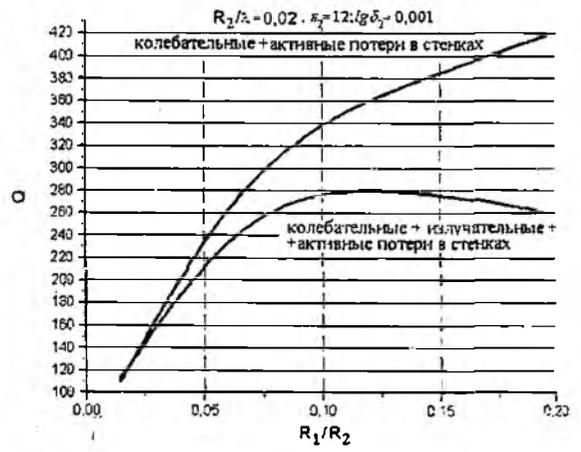


б

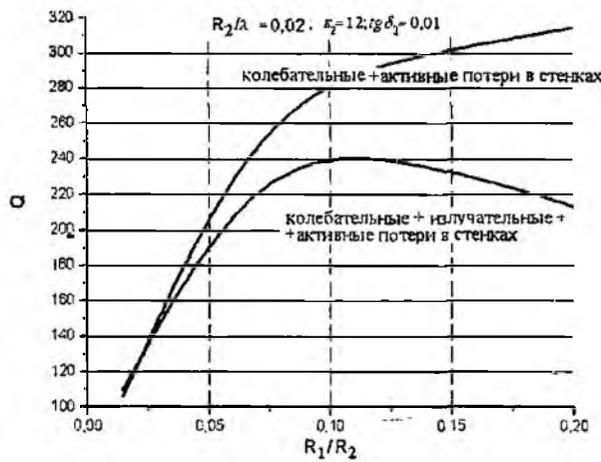
Рис. 6. Зависимость добротности от величины  $R_1/R_2$



б



г



д

Рис. 6 (Продолжение)

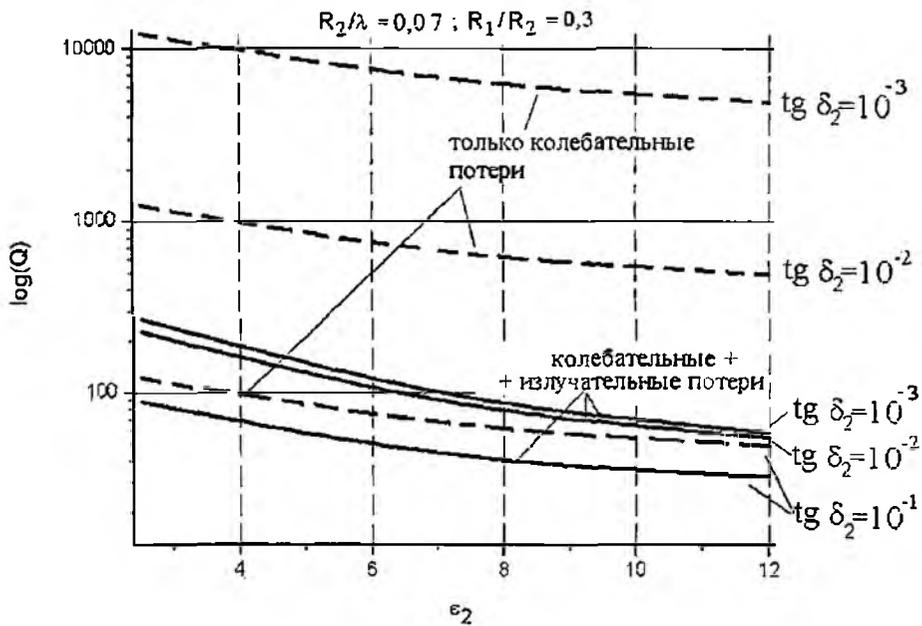


Рис. 7. Зависимость добротности от параметров образца

Однако в этих результатах уже отсутствует столь четкое разделение вкладов исследуемых потерь. Решить эту задачу возможно дополнительным исследованием чисто колебательного режима работы анализируемого РИП КИА. Для этого проводилось численное решение уравнений Гельмгольца для полностью замкнутых систем. Сравнение их с аналогичными характеристиками при малом  $\text{tg}\delta_2$  и без учета потерь в стенках резонатора показывает, что даже в случае малых раскрывов апертуры величина потерь на излучение весьма существенна (см. рис. 7).

На рис. 8 более детально приведены зависимости добротности от параметров объекта при различных раскрывах апертуры с учетом потерь в стенках резонатора.

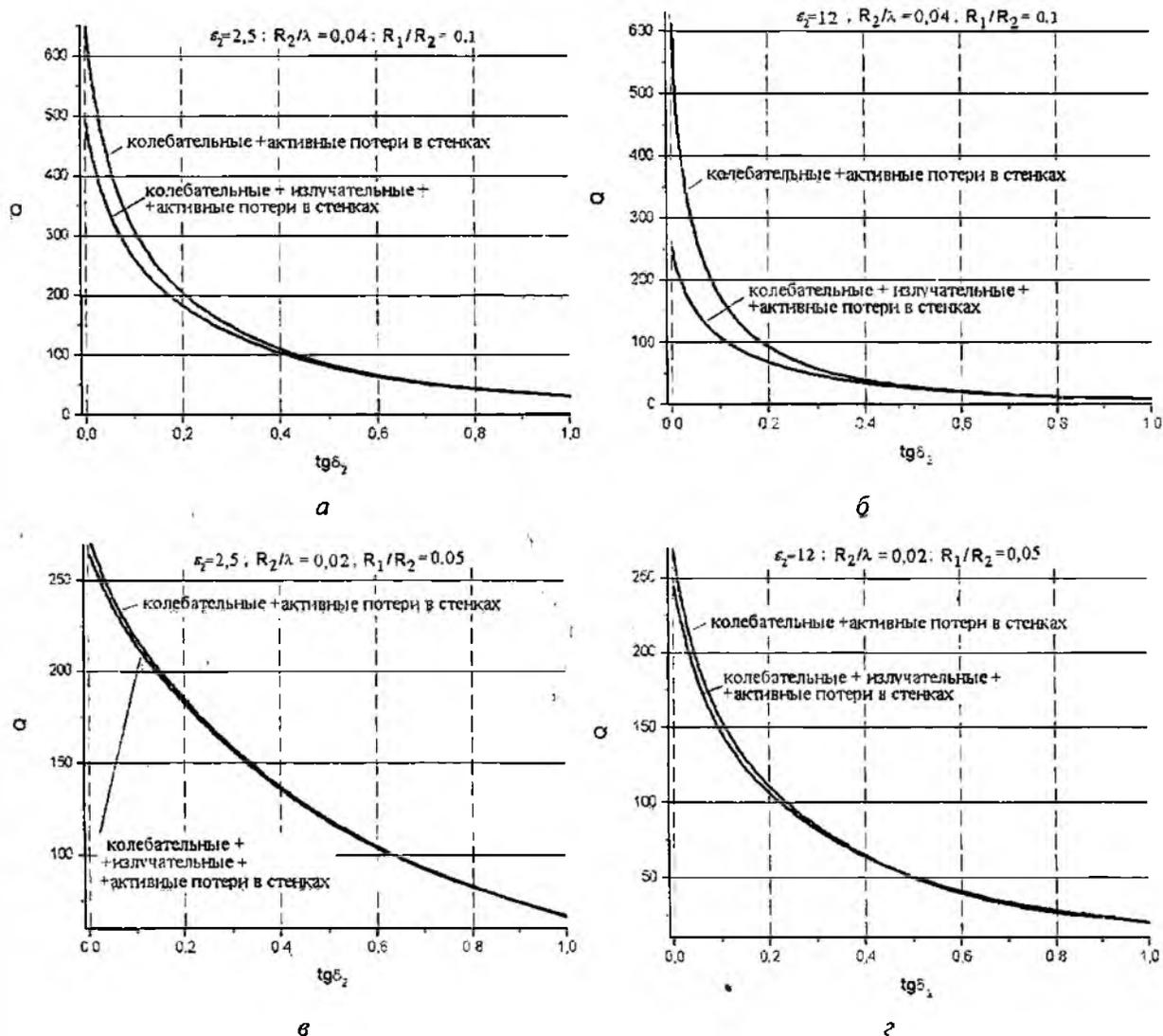


Рис. 8. Зависимость добротности от параметров объекта контроля и величины измерительной апертуры

### Выводы

Из приведенных графиков следует, что только при  $R_2/\lambda < 0,01$  и  $\text{tg}\delta_2 > 10^{-2}$  можно пренебречь излучательными потерями, по сравнению с колебательными.

Выполненные исследования убедительно свидетельствуют о том, что при использовании коаксиальной измерительной апертуры в МСМС диэлектриков с  $\text{tg}\delta_2 < 10^{-2}$ , пренебрежение влиянием потерь на излучение недопустимо. Для СВЧ влагометрии при раскрывах апертуры  $R_2/\lambda > 0,01$  в теоретических градуировках РИП необходимо учитывать потери на излучение, ввиду их значительного вклада и существенного падения добротности РИП. При этом целе-

сообразно ограничивать включение анализируемой пробы, например, нагрузкой апертуры за пределами на рабочей частоте объемом с пробой.

На рис. 9 приведены градуировочные характеристики РИП для СВЧ влагометрии сыпучих материалов, схема которого изображена на вставке рисунка. Расчет проведен с учетом потерь в стенках резонатора. Собственная добротность исходного РИП  $Q_0 = 3400$ .

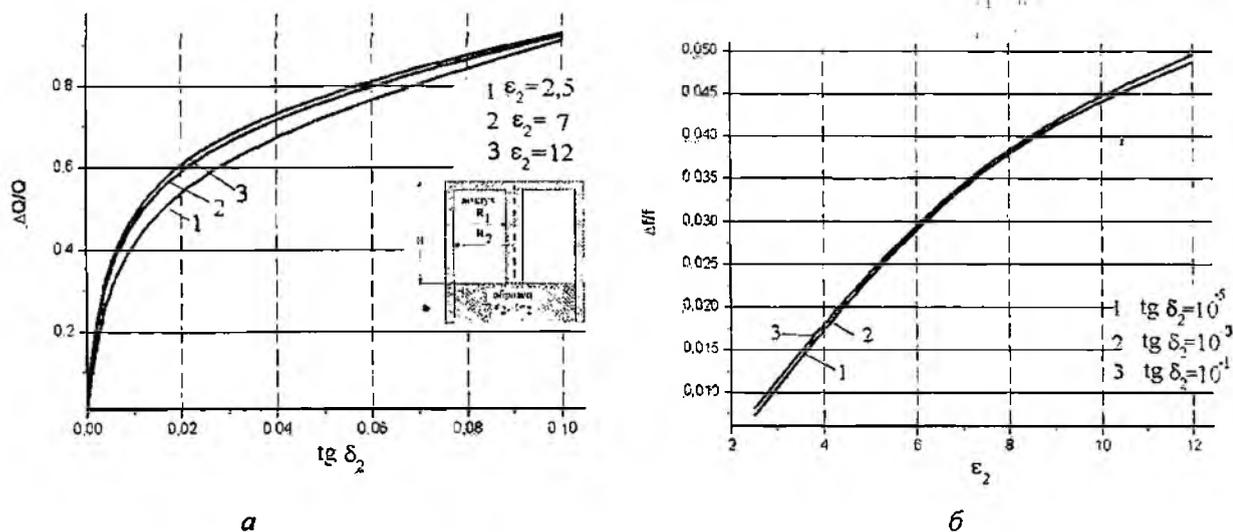


Рис. 9. Градуировочные характеристики для РИП с за пределами измерительной частью

Графики иллюстрируют достаточное разделение информационных сигналов данного РИП:  $\text{tg } \delta_2$  влияет преимущественно на величину  $\Delta Q/Q_0$ , а  $\epsilon_2$  – на  $\Delta f/f$ .

**Список литературы:** 1. *Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P. and other. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization. Southern Gate: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 537 p.* 2. *Гордиенко Ю. Е., Слипченко Н. И., Петров В. В. Чувствительность СВЧ резонаторных измерительных преобразователей для микроволновой микроскопии // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 3. С. 19 – 23.* 3. *Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Мн.: УОБГАТУ, 2005. 292 с.* 4. *Марчук Г. И., Агошков В. И. Введение в проекционно-сеточные методы. М.: Наука, 1981. 416 с.* 5. *Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.*

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 10.03.2009