

# МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЁМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

**В.В. Тимофеев**

*Барнаульский юридический институт МВД России, г. Барнаул*

В работе выполнен анализ известных технических решений в области частотного разнеса принимаемого и передаваемого сигналов радиочастотных ретрансляторов сигналов и проблемных вопросов технического характера, связанных с их реализацией, предложено собственное решение улучшения амплитудно-частотных характеристик систем фильтров с использованием объёмных резонаторов, выполненное с учётом современных тенденций реализации подобных систем. Целью работы является повышение технических характеристик объёмных резонаторов. В работе предлагается вариант повышения эксплуатационно-технических характеристик объёмных резонаторов. Предлагаемое решение апробировано на практике, выполнена метрологическая оценка его результатов.

Результатом исследования является разработка метода повышения эксплуатационно-технических характеристик объёмных резонаторов, ориентированная на улучшение качества их работы. Предлагаемое решение может быть применено при производстве ремонта и регламентном обслуживании объёмных резонаторов, в ходе их эксплуатации в системах радиосвязи различного назначения, реализованных с их использованием.

*Ключевые слова: объёмный резонатор, фильтрация радиочастотного сигнала, ретрансляторная радиосеть, характеристики объёмных резонаторов, полосовые фильтры, режекторные фильтры, радиочастотный ретранслятор.*

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитный резонатор является радиоэлектронным устройством, предназначенным для накопления энергии электромагнитных колебаний в объёме, образованном поверхностями с высоким значением электрической проводимости. Сам объём резонатора заполнен диэлектриком [1,3]. В простейшем случае – атмосферным воздухом.

В схемотехническом отношении резонатор является колебательным контуром, имеющим варианты технической реализации [3,4,13].

На достаточно низких частотах – до 30 МГц колебательные системы реализуются в виде параллельных и последовательных колебательных контуров на сосредоточенных электронных компонентах: ёмкости  $C$  и индуктивности  $L$ . На более высоких частотах используются компоненты с распределёнными параметрами  $C$  и  $L$  [3,13].

В качестве направлений использования резонансных элементов объёмного типа и многоэлементных структур на их основе в радиоэлектронной аппаратуре следует отметить полосовые, режекторные и полосо-режекторные фильтры различного назначения.

Актуальность работы определяется востребованностью объёмных резонаторов в качестве фильтрующих элементов в различных системах радиосвязи, например, аналоговых и цифровых ретрансляторных радиосетях и требованием повышения их технических характеристик, в связи с ограниченностью частотного ресурса, улучшения динамических характеристик радиопередающих

систем и уменьшения (по полосе частот и мощности) внеполосных излучений радиопередающих устройств [5,6,9].

Целью исследования является разработка метода повышения технических характеристик объёмных резонаторов, его апробация и метрологическая оценка.

Задачами настоящего исследования являются: выбор типового технического решения систем фильтрации радиочастотного сигнала с использованием объёмных резонаторов; анализ основных технических характеристик объёмных резонаторов; формирование методики улучшения их технических характеристик; метрологическая оценка полученного результата; формулировка выводов по итогам работы.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Вне зависимости от особенностей конструктивного исполнения, объёмному резонатору присущ спектр собственных колебаний и соответствующие им моды (виды колебаний). Каждая из мод имеет собственную структуру электрического и магнитного полей.

В соответствии с уравнениями Максвелла переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, и наоборот. Между электрическим и магнитным полями происходит непрерывный обмен энергией. В объёме пространства, ограниченном отражающими стенками, возникают условия, препятствующие потере энергии из этого объёма за счёт излучения. В этом объёме, на

длина волн, определяемых размерами устройства, можно возбудить электромагнитные колебания.

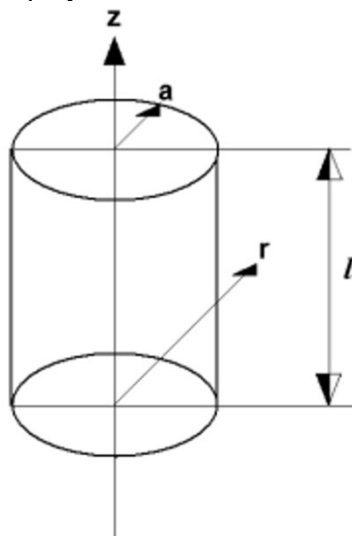
В простейших объёмных резонаторах на основе отрезков волновода, ограниченных с торцов проводящими стенками различают: колебания Н-вида, имеющие продольные (вдоль оси волновода  $z$ ) составляющие только магнитного поля  $H_z$  (составляющая электрического поля  $E_z=0$ ); колебания Е-вида, имеющие продольные составляющие только  $E_z$  ( $H_z=0$ ). При этом, нормальными волнами принято считать гармонические волны, которые могут устойчиво существовать в данной динамической системе.

В связи с тем, что электрические и магнитные поля почти не выходят за пределы границ объёмного резонатора, их добротность чрезвычайно высока (10000 и более). Указанное качество объёмных резонаторов делает их высокоэффективными в качестве фильтрующих элементов полосовых и режекторных фильтров.

При этом, следует отметить, что описанная картина электромагнитного поля формируется в идеальном объёмном резонаторе, имеющим абсолютное отражение от внутренних поверхностей, образующих его объём. Данное требование в полном объёме выполняется исключительно для поверхностей, имеющих нулевую шероховатость, что в свою очередь является недостижимым на практике [1,2,4].

Данное противоречие и является объективным пределом повышения технических характеристик реальных объёмных резонаторов.

Цилиндрический резонатор представляет собой полый цилиндр радиуса  $a$  и длиной  $l$ , закороченный с торцов проводящими основаниями. Общая конструкция цилиндрического резонатора представлена на рисунке 1.



$a$  – радиус резонатора;  $l$  – длина резонатора

Рис. 1. Цилиндрический резонатор

Возбуждение колебаний в объёмных резонаторах осуществляется с помощью петель связи, штырей, щелей и т.п. Объёмные резонаторы широко применяют в приборах СВЧ электроники (клизотронах, магнетронах и др.), устройствах техники ВЧ (волномерах, фильтрах и др.). При этом основные характеристики объёмного резонатора – резонансная частота, добротность и волновое сопротивление – отождествляются с характеристиками эквивалентного колебательного контура.

Таким образом, можно сделать вывод что, не смотря на разнообразие мод колебаний, присутствующих в резонаторе, его основные технические характеристики определяются степенью эффективности отражения энергии именно в правильном направлении – в соответствии с законами геометрической оптики.

В общем случае, объёмные резонаторы, относительно рассматриваемого в настоящей работе приложения их использования, эксплуатируются в режиме стоячей волны. Очевидно, что режим работы объёмного резонатора определяется его геометрическими размерами, способом возбуждения колебаний и их модой.

В этой связи представляется целесообразным физическую сущность процессов, происходящих в объёмном резонаторе представить введением понятия альbedo [1,2].

На этапе постановки эксперимента выдвинута гипотеза о возможности повышения эксплуатационных характеристик объёмного резонатора в случае выявления путей уменьшения потерь в нём.

Учитывая изложенное, очевидно, что минимизация численного значения альbedo позволит повысить общую энергетическую эффективность объёмного резонатора, поскольку увеличение доли правильного отражения по отношению к диффузному. На основе реализации этой зависимости и разработан предлагаемый метод.

В качестве объекта модернизации использовался имеющийся в наличии объёмный резонатор bandpass cavity model WP-430-1 компании WACOM. Устройство представляет из себя цилиндрический четвертьволновой объёмный резонатор диаметром 5" классической конструкции с воздушным диэлектриком. Возбуждение колебаний в резонаторе осуществляется с помощью петли связи, представляющей собой индуктивность последовательного колебательного контура, который, кроме функции возбуждения резонатора, выполняет роль режекторного фильтра на частоте своего резонанса. Конденсатор этого колебательного контура является подстроечным, что определяет возможность перестройки резонансной частоты контура, а следовательно – перестройки значения его центральной частоты подавления.

Внутреннюю отражающую поверхность объёмного резонатора исходного качества можно оценить как лучшую – неровности поверхности практически незаметны при визуальном осмотре.

К моменту написания настоящей работы микрометрические измерения шероховатости отражающей поверхности объёмного резонатора не выполнялись по трём причинам: во-первых составление корреляционной модели зависимости отражающего качества поверхности от степени качества её обработки не входит в задачи настоящего исследования и запланировано на некоторую перспективу; во-вторых измерительная база инструментов для выполнения микрометрических исследований далеко не всегда доступна широкому кругу пользователей связной аппаратуры и видится на данном этапе исследований неактуальной; в-третьих наличие явно выраженной положительной тенденции роста технических показателей характеристик объёмных резонаторов, установленная в ходе контрольных измерений до и после выполнения доработок по предлагаемой методике, позволяет признать апробацию метода положительной.

Улучшение качества отражающей поверхности объёмного резонатора выполнялось путём её механической обработки, с целью повышения класса чистоты поверхности. В качестве инструментального обеспечения на начальном этапе использовалась наждачная бумага с поэтапным уменьшением размера зерна, доводка выполнялась с использованием полировальных паст.

Исследование технических характеристик объёмных резонаторов осуществлялось на экспериментальной установке, описанной ранее [7,8]. Исследование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) устройства осуществлялось с использованием прибора для исследования АЧХ X1-48, добавленного к установке.

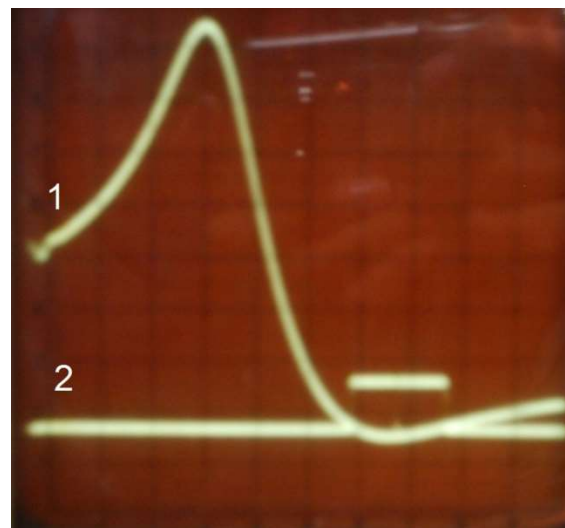
Первичное исследование АЧХ выполнялось на коаксиальной согласованной нагрузке номинальным сопротивлением 50 Ом, высокочастотный сигнал на которую подавался с выхода передатчика на одной из рабочих частот коаксиального резонатора через штатный направленный ответвитель измерителя АЧХ X1-48. К нему подключалась измерительная головка прибора X1-48. Кроме этого на вход калибратора измерителя АЧХ подавался сигнал меток от внешнего кварцевого калибратора, относительно которых и выполнялись измерения.

Таким образом, оценка предлагаемого метода выполнена путём непосредственного измерения электрических параметров объёмного резонатора, характеристики которого предполагалось повысить.

Исследование АЧХ фильтра выполнялось отдельно для полосового и режекторного фильтров. На рисунке 2 представлена высокочастотная ветвь ската характеристики полосового фильтра, на рисунке

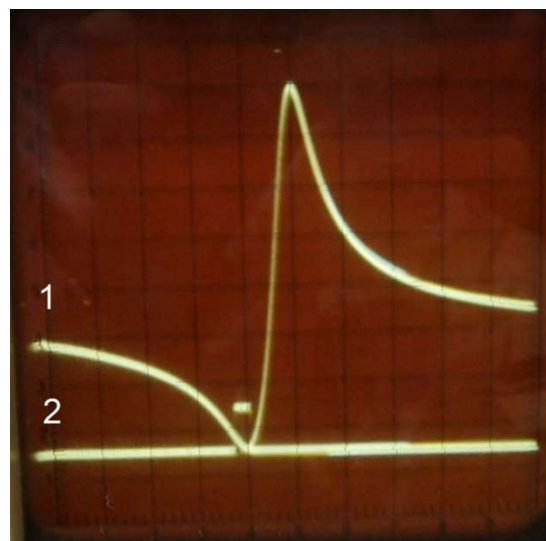
3 – низкочастотная ветвь ската характеристики полосового фильтра.

Количественная оценка амплитудных составляющих характеристик выполнена по показаниям аттенюатора входного сигнала измерителя АЧХ X1-48.



1 – исследуемый сигнал; 2 – сигнал внешнего калибратора.

Рис. 2. АЧХ высокочастотного ската характеристики фильтра



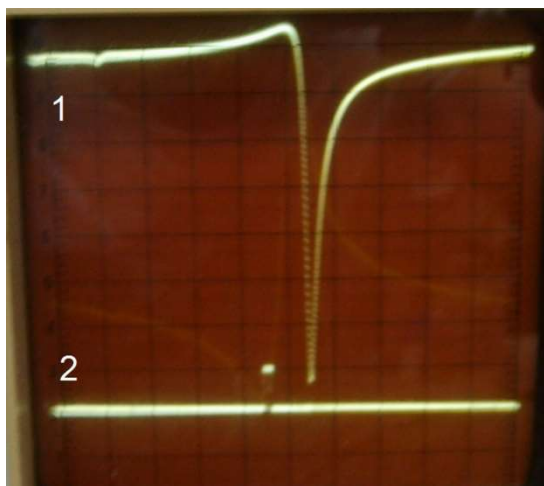
1 – исследуемый сигнал; 2 – сигнал внешнего калибратора.

Рис. 3. АЧХ низкочастотного ската характеристики фильтра

По результатам измерений достигнуто увеличение затухания режекторного звена фильтра на 5 dB. Аналогичный результат получен и для полосового фильтра в неизменной полосе пропускания. Измерения проводились для различных рабочих частот диапазона ОВЧ.

При моделировании процессов настройки либо оптимизации параметров фильтров может быть использована методика, описанная ранее [12].

На рисунке 4 представлена АЧХ режекторного звена фильтра в процессе его настройки на рабочую частоту.



1 – исследуемый сигнал; 2 – сигнал внешнего калибратора.

Рис. 4. АЧХ режекторного звена фильтра

Полученный результат показывает, что причиной получения в ходе эмпирических исследований значений добротности объёмного резонатора, как обобщённого показателя его качества, существенно меньших теоретических значений, полученных путём вычислений, может являться неудовлетворительное качество его внутренней поверхности, являющейся отражательной. В теоретическом отношении, кроме увеличенного альбеда, подобная ситуация может возникнуть из-за увеличения толщины скин-слоя, относительно табличных значений удельной проводимости металла стенок резонатора.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги выполненного исследования, можно обоснованно утверждать, что задачи, поставленные на этапе его планирования, решены в полном объёме.

В ходе выполнения исследования разработана и апробирована методика повышения эксплуатационно-технических характеристик объёмных резонаторов, реализуемая в условиях отсутствия парка станочного оборудования силами технического персонала, обслуживающего связанное оборудование и его антенно-фидерное хозяйство. Таким образом, цель исследования является достигнутой.

Поскольку, в ходе выполнения настоящего исследования, инструментально установлено реальное повышение технических характеристик доработанного объёмного резонатора, метод можно считать успешно апробированным и рекомендовать его с целью улучшения характеристик объёмных резонаторов, вновь устанавливаемых в антенно-

фидерные тракты радиостанций и ретрансляторных устройств различного назначения [5,9,10,11]. Кроме этого, предлагаемая методика может быть использована в ходе реконструкции и капитального ремонта антенно-фидерных устройств указанного выше оборудования связи.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Издательская группа URSS, 2014. — 544 с. — ISBN 978-5-397-04180-5.
2. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. — М.: НАУКА, 2003. — 471 с. — ISBN: 5-02-024976-9.
3. Геворкян В.М., Кочемасов В.Н. Объёмные диэлектрические резонаторы — основные типы, характеристики, производители. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2016. № 4 (00154), С. 62-76.
4. Бунин А.В., Вишняков С.В., Геворкян В.М., Михалин С.Н. Полосно-пропускающие фильтры Ку-диапазона на диэлектрических резонаторах. Базовая модель. // Электронная техника. 2011. вып.2 (509), С.4–12. (Серия 1. СВЧ техника).
5. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Оптимизация спектрального состава выходного сигнала радиопередающей аппаратуры. // Ползуновский альманах, 2009.- № 2. - с. 174-175.
6. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Щербинин В.В. Разработка метода и средства контроля качества согласования РПА с АФУ// Управление, контроль, диагностика, 2009. - № 9 – с. 41-45.
7. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Щербинин В.В. Метод контроля качества согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом.// Естественные и технические науки, 2009. - № 3 (41) – с. 312-314.
8. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Экспериментальная установка для исследования качества согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом. Измерение, контроль, информатизация: Материалы девятой международной научно-технической конференции./ Под. Ред. Л.И. Сучковой – Барнаул: АлтГТУ, 2008. – с. 228-230.
9. Тимофеев В.В. Проблемы снижения уровня внеполосных излучений радиопередающей аппаратуры, расположенных в непосредственной близости от частоты основного сигнала. //Ползуновский альманах, 2007.- № 3.- с. 99-101.
10. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Контроль параметров излучения радиопередающей аппаратуры, как основное направление повышения эффективности использования частотного ресурса. // Методы и средства измерения физических величин: Сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции. – Нижний Новгород: НИМЦ Диалог, 2007.- с. 31-32.
11. Надвоцкая В.В. Разработка системы контроля поддержания пластового давления при нефтедобыче / В.В. Надвоцкая, В.В. Тимофеев // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 1. – с. 33-37..
12. Тимофеев В.В., Надвоцкая В.В. Прикладное применение безусловной оптимизации функций численными методами // Математические методы и информационно-технические средства: материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф., 15 июня 2018 г. / ред. кол. : И. Н. Старостенко, Е. В. Михайленко, А. К. Назаров, А. А. Хромых. – Краснодар : Краснодарский университет МВД России, 2018. – 304-311.
13. Nishikawa T., Wakino K., Tsanoda K., Ishikawa Y., Dielectric high-power band-pass filter using quarter-out TE<sub>01δ</sub> image resonator for cellular base stations. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., D-2, 1987, pp. 133–136.

Тимофеев Виктор Владимирович, к.т.н., б/з – доцент кафедры информатики и специальной техники, Барнаулский юридический институт МВД России, тел. (3852)379376, e-mail v.v.timofeev@bk.ru.

# METHOD FOR IMPROVING THE OPERATIONAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF CAVITY RESONATORS

V.V. Timofeev

*Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Barnaul*

The paper analyzes the known technical solutions in the field of frequency separation of the received and transmitted signals of radio frequency signal repeaters and technical issues related to their implementation, and offers its own solution to improve the amplitude-frequency characteristics of filter systems using cavity resonators, made taking into account current trends in the implementation of such systems. The aim of this work is to improve the technical characteristics of cavity resonators. In this paper, we propose a variant of improving the operational and technical characteristics of cavity resonators. The proposed solution was tested in practice, metrological evaluation of its results was performed. The result of the research is the development of a method for improving the operational and technical characteristics of cavity resonators, focused on improving the quality of their work. The proposed solution can be applied in the production of repairs and routine maintenance of cavity resonators, during their operation in radio communication systems for various purposes, implemented with their use.

Index terms: cavity resonator, radio frequency signal filtering, repeater radio network, characteristics of cavity resonators, bandpass filters, notch filters, radio frequency repeater.

## REFERENCES

1. Nicholsky V.V., Nikolskaya T. I. Electrodynamics and propagation of radio waves. — M.: URSS Publishing group, 2014. — 544 p. — ISBN 978-5-397-04180-5.
2. Timofeev Yu. M., Vasil'ev A.V. Theoretical fundamentals of atmospheric optics. — M.: NAUKA, 2003. — 471 p. — ISBN: 5-02-024976-9.
3. Gevorgyan, V. M., Kochemasov, V. N. Dielectric bulk crystals – main types, features, manufacturers. // *Electronics: science, technology, business*. 2016. No. 4 (00154), pp. 62-76.
4. Bunin A.V., Vishnyakov S. V., Gevorkyan V. M., Mikhalin S. N. Band-pass filters of the Ku-band on dielectric resonators. The basic model. // *Electronic equipment*. 2011. issue 2 (509), C. 4-12. (Series 1. Microwave technology).
5. Timofeev V. V., Pronin S. P., Zryumov E. A. Optimization of the spectral composition of the output signal of radio transmitting equipment. // *Polzunovsky almanac*, 2009. - No. 2. - pp. 174-175.
6. Timofeev V. V., Pronin S. P., Zryumov E. A., Shcherbinin V. V. Development of a method and means of quality control for approving RPA with AFU // *Management, control, Diagnostics*, 2009. - No. 9-pp. 41-45.
7. Timofeev V. V., Pronin S. P., Zryumov E. A., Shcherbinin V. V. Method of quality control of matching an antenna-feeder device with a radio transmitting device. // *Natural and Technical Sciences*, 2009. - № 3 (41) – pp. 312-314.
8. Timofeev V. V., Pronin S. P., Zryumov E. A. Experimental setup for studying the quality of matching an antenna-feeder device with a radio transmitting device. Measurement, control, informatization: Materials of the ninth international scientific and technical conference. / Ed. by L. I. Suchkova-Barnaul: AltSTU, 2008. - p. 228-230.
9. Timofeev V. V. Problems of reducing the level of out-of-band radiation of radio transmitting equipment located in the immediate vicinity of the frequency of the main signal. // *Polzunovsky almanac*, 2007. - No. 3. - pp. 99-101.
10. Timofeev V. V., Pronin S. P., Zryumov E. A. Control of radiation parameters of radio transmitting equipment, as the main direction of increasing the efficiency of using the frequency resource. // *Methods and means of measuring physical quantities: Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific Conference*. - Nizhny Novgorod: NIMC Dialog, 2007. - pp. 31-32.
11. Nadvotskaya V. V. Development of a control system for maintaining reservoir pressure in oil production / V. V. Nadvotskaya, V. V. Timofeev // *South Siberian Scientific Bulletin*. - 2021. - No. 1. - pp. 33-37.
12. Timofeev V. V., Nadvotskaya V. V. Applied application of unconditional optimization of functions by numerical methods // *Mathematical methods and information and technical means: materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference*, June 15, 2018 / ed. Col.: I. N. Starostenko, E. V. Mikhailenko, A. K. Nazarov, A. A. Khromykh. - Krasnodar : Krasnodar University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2018 – 304-311.
13. Nishikawa T., Wakino K., Tsanoda K., Ishikawa Y., Dielectric high-power band-pass filter using quarter-out TE<sub>01δ</sub> image resonator for cellular base stations. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, D-2, 1987, pp. 133–136.

*Timofeev Viktor Vladimirovich., Ph. D., associate Professor of Department of Informatics and Special Equipment, Barnaul law Institute of MIA Russia tel: (3852)379376, e-mail v.v.timofeev@bk.ru.*