

# CUMULATIVE PROPERTIES OF THE CAVITY RESONATORS

Bondarenko I.N., Gorbenko E.A.  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
Kharkov, Lenin av., 14, 61166, Ukraine  
Ph.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

**Abstract** — Theoretical evaluation of cumulative properties of a microwave cavities to identify their possible use as storage of electromagnetic energy in devices of formation of the microwave pulses of increased power are carried out. It is shown that in metallic cavity resonators with quality factor  $10^3 - 10^4$  can be achieved density energy storage about  $3 \cdot 10^{-4}$  J/cm<sup>3</sup>.

## НАКОПИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Бондаренко И.Н., Горбенко Е.А.  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
г. Харьков, пр. Ленина, 14, 61166, Украина  
тел.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

**Аннотация** — Проведена теоретическая оценка накопительных свойств микроволновых объемных резонаторов с целью выявления возможности их использования в качестве накопителей электромагнитной энергии в устройствах формирования СВЧ импульсов повышенной мощности. Показано, что в объемных металлических резонаторах при добротностях  $10^3 - 10^4$  может быть достигнута плотность накопления энергии порядка  $3 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>3</sup>.

### I. Введение

В последние десятилетия проведен большой объем физических исследований и разработок устройств формирования мощных и сверхмощных электромагнитных импульсов [1]. Такие устройства востребованы в самых различных областях науки и техники. Классификация существующих и разрабатываемых устройств может быть проведена по различным признакам: по форме, длительности и энергии импульсного сигнала, диапазону частот, энергопотреблению, стационарности и мобильности, многообразному или одноразовому использованию, источнику или накопителю энергии, способам формирования импульсов, задачам применения и т. п.

Одним из направлений таких исследований являются устройства, основанные на накоплении энергии в высокодобротных резонансных объемах с последующим быстрым выводом [2]. При этом могут быть сформированы мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности при сравнительно невысокой мощности источника накачки и относительно малых габаритах устройства в целом. В тоже время для эффективной работы такого устройства накопительный резонатор должен обладать как можно более высокой добротностью. В работах [2 - 4] предлагается использовать сверхпроводящие объемные резонаторы с добротностями порядка  $10^6 \dots 10^8$ . Применение таких резонаторов безусловно позволяет обеспечить высокий коэффициент преобразования накопленной энергии в мощный импульсный сигнал, но требует использования криоэлектронных технологий, что, в свою очередь, усложняет и удорожает конструкцию устройства, а также снижает его мобильность.

В связи с этим представляется целесообразным проведение оценки накопительных свойств обычных (неохлаждаемых) объемных резонаторов с целью выявления возможности их использования в качестве накопителей электромагнитной энергии.

### II. Основная часть

В качестве объекта исследований был выбран объемный цилиндрический резонатор, возбуждаемый на высокодобротном типе колебаний  $H_{011}$ .

Выражения для полей в таком резонаторе могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} H_z &= B_{011} I_0 \left( \frac{\mu_{01}}{r_0} r \right) \sin \left( \frac{\pi}{h} z \right); \\ H_r &= B_{011} \frac{\pi r_0}{h \mu_{01}} I_0' \left( \frac{\mu_{01}}{r_0} r \right) \cos \left( \frac{\pi}{h} z \right); \\ E_\varphi &= j B_{011} \frac{\omega \mu_0 r_0}{\mu_{01}} I_0' \left( \frac{\mu_{01}}{r_0} r \right) \sin \left( \frac{\pi}{h} z \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mu_{01}$  – корень производной функции Бесселя ( $\mu_{01} \approx 3,832$ );  $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м;  $I_0$  и  $I_0'$  – функция Бесселя и производная функции Бесселя;  $r_0$  – радиус резонатора;  $h$  – длина резонатора;  $\omega$  – рабочая частота;

Коэффициент  $B_{011}$  может быть определен из следующего соотношения [5]

$$B_{011} = \sqrt{\frac{4P_{вх} Q_H \beta_1}{G_{H_{011}} (1 + \beta_1 + \beta_2) \pi r_0 \left[ \frac{1}{4} I_0^2(\mu_{01}) h + \frac{\pi r_0^3}{(h \mu_{01})^2} I_1^2(\mu_{01}) \right]}} \quad (2)$$

(Величина  $G_{H_{011}} = 780$  Ом при  $h = 2r_0$ ).

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов  $B_{011}$  от мощности входного сигнала ( $P_{вх} = 10^3 - 10$  кВт), нагруженной добротности ( $Q_H = 10 - 10^6$ ) при различных коэффициентах связи ( $\beta_1 = \beta_2 = 0,01; 0,1; 1,0$ ), вычисленные по формуле (2) для цилиндрических резонаторов трехсантиметрового диапазона с размерами:  $H_{011} - h = 2r_0 = 4 \cdot 10^{-2}$  м ( $\omega = 2\pi f$ , где  $f = 10$  ГГц).

Подставляя численные значения в соотношения (1) нетрудно убедиться, что напряженности магнитных и электрических полей достигают значительных величин даже при сравнительно невысоких уровнях мощности входного сигнала. Однако, при высоких значениях напряженностей электрических и магнитных полей начинают проявляться различные

нежелательные эффекты и явления, которые приводят к снижению предельных уровней электромагнитных полей.

К таким явлениям можно отнести электрический пробой и автоэлектронную эмиссию из рабочих поверхностей резонатора.

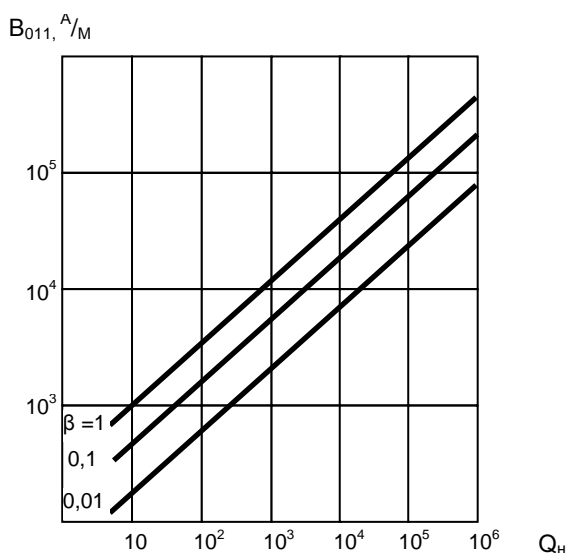
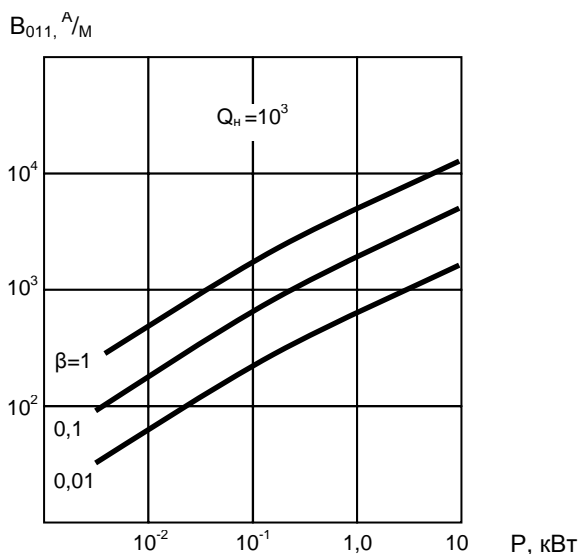


Рис. 1. Зависимость коэффициентов  $B_{011}$  от мощности входного сигнала и нагруженной добротности ( $P=10$  кВт)

Fig. 1. The dependence of the  $B_{001}$  coefficients from the input power and the loaded quality factor ( $P=10$  kW)

Задаваясь предельным значением пробойной напряженности электрического поля в вакууме  $P \approx 3 \cdot 10^6$  В/м из соотношений (1) для электрической составляющей поля типа колебаний  $H_{011}$  для коэффициента  $B_{011}$  получим величину  $\sim 1,25 \cdot 10^4$  А/м. Согласно графикам (рис. 1) такое значение достигается при  $P_{вх} = 10$  кВт,  $\beta_1 = \beta_2 = 1$  и  $Q_n = 10^3$ .

С учетом полученных значений можно оценить величину энергии, накапливаемую в резонаторе [3]:

$$W_n = \mu_0 \cdot B_{011} \cdot V / 3,432, \quad (3)$$

где  $V$  – объем резонатора.

Для рассматриваемого резонатора эта величина составит  $\sim 4,5 \cdot 10^{-4}$  Дж. Для резонатора на частоту 2,45 ГГц ( $r_0 = 0,11$  м,  $h = 0,22$  м) с учетом соотношений (1) – (3) получим  $\sim 7,65 \cdot 10^{-2}$  Дж. В работе [2] приводятся ссылки на экспериментально полученные значения напряженностей электрических полей в объемных медных резонаторах порядка  $1,5 \cdot 10^8$  В/м. Учет этих данных приводит соответственно к значениям накопленной энергии  $\sim 1,6 \cdot 10^{-2}$  Дж для резонатора трехсантиметрового диапазона и  $\sim 2,75$  Дж для резонатора дециметрового диапазона. Плотность энергии составляет при этом  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>3</sup>.

С ростом частоты при сохранении достигаемой плотности энергии накопительные возможности объемных резонаторов ухудшаются за счет уменьшения объемов резонансных полостей. Следовательно, для накопления большего запаса энергии необходимо переходить в нижнюю часть СВЧ диапазона.

Повысить значения предельных электрических полей в резонаторе и, соответственно, плотность накапливаемой энергии, можно за счет заполнения диэлектриком с высоким пробивным напряжением, однако при этом необходимо учитывать возможное уменьшение объема резонатора (в  $\epsilon^{3/2}$  раз, где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала заполнения), что, в свою очередь, уменьшает суммарную энергию, накапливаемую в резонаторе.

### III. Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- использование даже относительно малогабаритных объемных резонаторов обеспечивает накопление энергии, достаточной для функционирования устройств формирования СВЧ импульсов;

- повышение добротности накопительного резонатора позволяет пропорционально уменьшать мощность входного сигнала накачки резонатора при сохранении достигаемых значений плотности накапливаемой энергии;

- величина добротности накопительного резонатора может быть увеличена за счет перехода к более оптимальной геометрической форме (например, сферической), работе на других типах колебаний (например,  $H_{01n}$ ), а также за счет уменьшения величины коэффициентов связи.

В тоже время, реальные практические возможности рассмотренных резонаторов-накопителей могут быть оценены только после проведения теоретических и экспериментальных исследований динамических режимов функционирования устройств формирования СВЧ импульсов на их основе.

### IV. References

- [1] Explosive generators of powerful pulses of an electrical current / edited by V.E. Fortov. – M.: Nauka, 2002. – 399 p.
- [2] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности / М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
- [3] Бондаренко, И.Н. Накопление электромагнитной энергии в сверхпроводящем резонаторе / *Збірник наукових праць. – Харків. ХВУ. – 2000. – Вип.2 (28) – с. 24–29.*
- [4] Бондаренко, И.Н. Генерация мощных СВЧ импульсов с помощью устройств на основе сверхпроводящих резонаторов / *Радиотехника. Всеукр. міжвед. н.- т. сб.* Харьков, 2003. Вып. 135. – с. 32-37.
- [5] Bondarenko I.N. Dominant factors restricting limit values of electromagnetic fields in superconducting resonators / *Telecommunications and Radio Engineering*. Begell Hous, Inc., NY, (USA). – 2002. – Vol.57, N1. pp. 14-29.