



Особенности характеристик кольцевых резонаторов

*И. Фрейдович,
М. Воробьев*

МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ

Разработка и производство мощных электровакуумных приборов СВЧ-диапазона — та область, где позиции отечественной электроники наиболее сильны. ГНПП «Торий» принадлежит к числу российских предприятий, успешно работающих в данном направлении. Сегодня специалисты ГНПП знакомят читателей с новой методикой расчета амплитудно- и фазочастотных характеристик кольцевых резонаторов, работающих на низшем виде колебаний, с учетом потерь.

В современных мощных радио-передающих устройствах СВЧ-диапазона пролетные усилительные клистроны применяются достаточно часто, обеспечивая высокие значения импульсной и средней мощности, усиления и КПД. Однако традиционным однолучевым клистроном большой мощности присущ серьезный недостаток — высокое напряжение луча, достигающее десятков и сотен киловольт. Избежать его позволяет применение многолучевых клистронов (МЛК), в которых при более высоком КПД и широкополосности напряжение луча в два-три раза ниже, чем в однолучевых.

Повышение мощности МЛК путем увеличения числа лучей вызвало переход от традиционных тороидальных резонаторов с размещением лучей в центре к принципиально новым, обеспечивающим радиальную равномерность поля в зазоре взаимодействия. Один из возможных типов новых резонаторов — кольцевые резонаторы (КР), допускающие размещение многих лучей по длине кольца. КР представляет собой свернутый в кольцо волновод, у которого рабочий вид колебаний соответствует волне H_{10} , без вариаций по азимуту.

За последние 20 лет в ГНПП «Торий» создан ряд МЛК с КР различного назначения. Например, клистрон КИУ-111 для ускорителей электронов при импульсной мощности 5 МВт имеет то же напряжение луча, что и напряжение магнетрона равной мощности — 50 кВ. Напряжение аналогичных однолучевых клистронов — 120—140 кВ. Клистрон оснащен пакетированной фокусирующей системой на постоянных магнитах, что в сочетании с низким напряжением луча делает его вполне конкурентоспособным на мировом

рынке. Однако зарубежные заказы потребовали перейти с частоты 2450 МГц на 2856 МГц (клистрон КИУ-111А) и 2998 МГц, используемые в США и Западной Европе. Увеличение отношения длины кольца КР к длине волны выявило ряд специфических эффектов, связанных с влиянием высших видов колебаний на рабочий вид.

При расчете характеристик многолучевых клистронов обычно используют приближение идентичных лучей, в котором шунтовое сопротивление резонаторов моделируется уравнениями параллельного контура. Но уже неоднократно отмечалось, что реальные характеристики КР отличаются от характеристик параллельного контура. Это проявляется в несовпадении АЧХ- и ФЧХ-полей, измеренных в различных радиальных сечениях КР, а также в несимметричности характеристик относительно резонансной частоты. Кроме того, несмотря на значительный объем экспериментальных данных, характеристики КР изучены недостаточно. В работе [1] рассмотрено влияние азимутально несимметричной нагрузки на азимутальное распределение амплитуды и фазы полей в зазоре взаимодействия. Однако эксперименты свидетельствуют, что в ряде случаев АЧХ и ФЧХ КР отличаются от характеристик параллельного контура и при полном отсутствии сосредоточенной

нагрузки. Естественный путь разрешения этих проблем — разработка методики непосредственного расчета АЧХ и ФЧХ КР на рабочем и высших видах колебаний.

Методика расчета АЧХ и ФЧХ кольцевого резонатора

Для описания КР примем за основу эквивалентную схему, предложенную в работе [1]. Представим кольцевой резонатор в виде бесконечной цепочки каскадно соединенных четырехполюсников (рис.1), каждый из которых — отрезок волновода с волной H_{10} . Токи и напряжения в цепочке удовлетворяют условиям периодичности с периодом L , равным длине кольца по средней линии. На одном периоде L размещено N четырехполюсников, к разъемам которых подключено N источников тока, соответствующих электронным пучкам или возбуждающим зондам.

Рассмотрим случай, когда резонатор не связан с внешней нагрузкой, а $I_1 = I_2 = \dots = I_N = I_0 / N$, причем длина всех четырехполюсников одинакова (L/N). Этот случай соответствует КР, возбуждаемому N симметрично расположенными электронными лучами (промежуточный резонатор МЛК).

Обозначим ток на входных (левых) разъемах N -го четырехполюсника $I_{Nвх}$, а на выходных разъемах — $I_{Nвых}$. Напряжение на входных разъемах N -

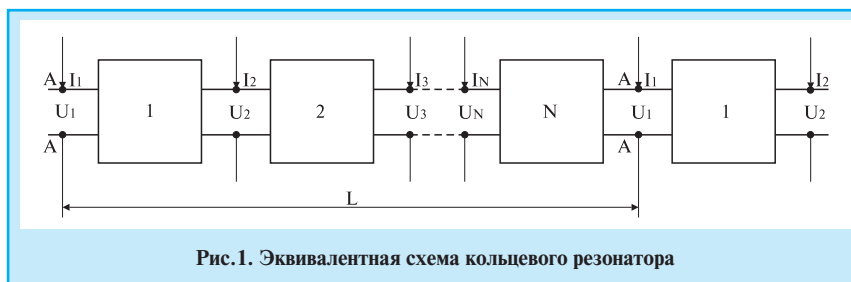


Рис.1. Эквивалентная схема кольцевого резонатора

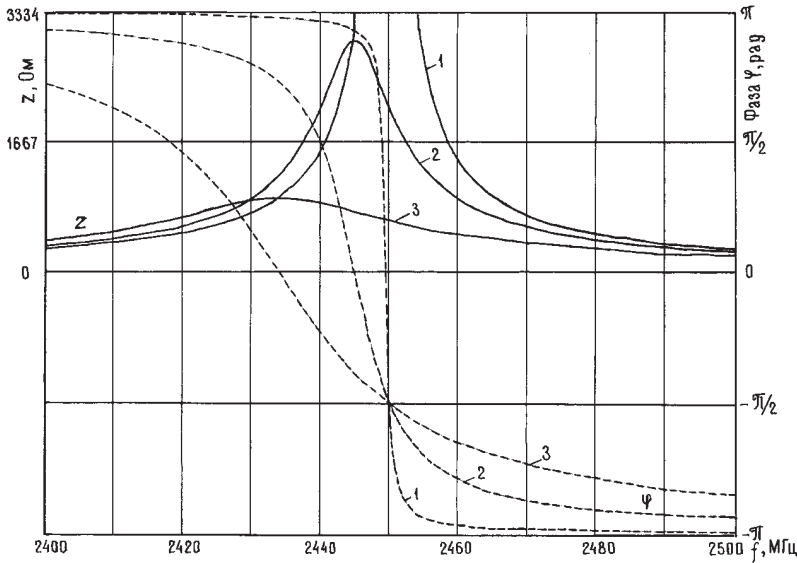


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ кольцевого резонатора при возбуждении 20 источниками тока (Z_{\max} — максимальное значение модуля шунтового сопротивления, Q — значение добротности, рассчитанное по уровню 0,7):
 1. $\sigma=5,8 \cdot 10^6$ См/м, $Q=2449$, $Z_{\max}=29436$ Ом; 2. $\sigma=5,8 \cdot 10^4$ См/м, $Q=239$, $Z_{\max}=2953$ Ом;
 3. $\sigma=5,8 \cdot 10^3$ См/м, $Q=76$, $Z_{\max}=933$ Ом

го четырехполюсника — U_N . Из теории длинных линий [2], используя условие периодичности, получаем систему из $3N$ уравнений с $3N$ неизвестными:

$$\begin{aligned} I_{N \text{ ввх}} + I_1 &= I_{1 \text{ вх}}, \\ I_{1 \text{ ввх}} + I_2 &= I_{2 \text{ вх}}, \\ \dots \\ I_{(N-1) \text{ ввх}} + I_N &= I_{N \text{ вх}}, \\ U_1 &= U_N \cdot \text{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) - I_N \cdot Z_3 \cdot \text{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}), \\ U_2 &= U_1 \cdot \text{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) - I_1 \cdot Z_3 \cdot \text{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}), \\ \dots \\ U_N &= U_{(N-1)} \cdot \text{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) - I_{(N-1)} \cdot Z_3 \cdot \text{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}), \\ I_{1 \text{ ввх}} &= I_{1 \text{ вх}} \cdot \text{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) - \frac{U_1}{Z_3} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}), \\ I_{2 \text{ ввх}} &= I_{2 \text{ вх}} \cdot \text{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) - \frac{U_2}{Z_3} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}), \\ \dots \\ I_{N \text{ ввх}} &= I_{N \text{ вх}} \cdot \text{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) - \frac{U_N}{Z_3} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\gamma = \alpha + j\beta$ — комплексная постоянная распространения, а Z_3 — эквивалентное сопротивление волновода.

Решая систему уравнений, находим, что напряжения на разъемах четырехполюсников равны между собой и определяются выражением:

$$U = -\frac{I_0 Z_3}{2N} \cdot \text{cth}(\gamma \cdot \frac{L}{2N}). \quad (2)$$

Отношение U/I_0 — шунтовое сопротивление резонатора.

В большинстве реальных клистронов применяются H - и P -образные волноводы. Поскольку по характеристикам они близки к прямоугольным, ограничимся рассмотрением регулярно прямоугольного волновода, учитывая

что эквивалентное сопротивление H - и P -волноводов в 1,1–1,6 раза выше прямоугольного при той же длине зазора взаимодействия. Эквивалентное сопротивление волновода на волне TE_{10} определяется выражением:

$$Z_3 = j \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\omega \mu \mu_0}{\gamma}, \quad (3)$$

где b — высота волновода (длина зазора), a — ширина волновода, ω — циклическая частота.

Чтобы рассмотреть зависимости постоянной распространения γ от частоты, воспользуемся методикой,

предложенной в работе [3]. Выражения, определяющие и в прямоугольном волноводе с вакуумным наполнением и стенками, имеющими конечное сопротивление, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt[4]{A^2 + B^2} \cdot \cos \frac{\theta}{2}, \\ \beta &= \sqrt[4]{A^2 + B^2} \cdot \sin \frac{\theta}{2}, \text{ где} \\ A &= -\sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \cdot \frac{\pi^2}{a^2} \cdot \left(\frac{2}{a} + \frac{K^2 a^2}{b \pi^2} \right) + \frac{\pi^2}{a^2} - K^2, \\ B &= \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \cdot \frac{\pi^2}{a^2} \cdot \left(\frac{2}{a} + \frac{K^2 a^2}{b \pi^2} \right), \\ \theta &= \arctg \frac{B}{A}. \end{aligned} \quad (4)$$

где σ — удельная проводимость стенок резонатора, См/м; K — постоянная распространения (продольное волновое число) в свободном пространстве, 1/м.

Важно отметить, что данные выражения верны и в окрестности критической частоты волновода, близкой к частоте рабочего вида колебаний КР.

Подставляя формулы (3) и (4) в (2), рассчитаем частотные зависимости модуля Z и фазы Φ шунтового сопротивления КР, т.е. его АЧХ и ФЧХ. На рис. 2 представлены результаты этих расчетов для КР, образованного волноводом с критической частотой 2450 МГц и длиной кольца по средней линии 236 мм, при различных значениях удельной проводимости стенок. Резонатор возбуждается 20 симметрично расположенными источниками тока. При этом исключается возможность вынужденных колебаний на 19 высших видах, ближайших к рабочему.

Анализируя полученные АЧХ и ФЧХ, отметим, что предлагаемая методика расчета подтверждает извест-

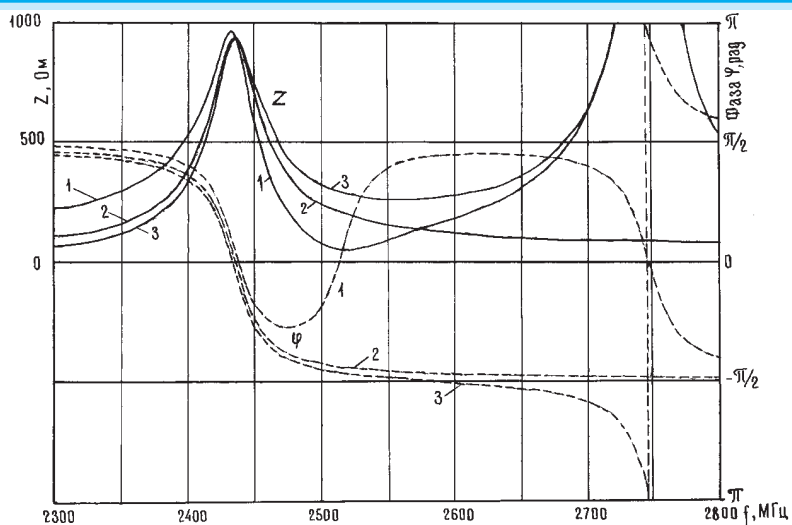


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ кольцевого резонатора длиной 236 мм при возбуждении одним источником тока ($\sigma = 5,8 \cdot 10^3$ См/м):
 1. $x=0$ мм, $\psi=0^\circ$; 2. $x=59$ мм, $\psi=90^\circ$; 3. $x=118$ мм, $\psi=180^\circ$

ный эффект уменьшения резонансной частоты при увеличении потерь в стенках. Несмотря на несимметричность зависимостей и от частоты в области $f_{кр}$ при больших потерях в стенках, АЧХ и ФЧХ резонатора остаются практически симметричными даже при низкой добротности. При любых значениях добротности резонатора на рабочем виде колебаний частота, соответствующая максимуму модуля шунтового сопротивления, и частота, при которой фаза шунтового сопротивления равна нулю, совпадают, т.е. сопротивление — чисто активное. Величина, определяемая как $\rho = Z_{max}/Q$, (5) соответствующая характеристическому сопротивлению параллельного контура, остается постоянной при любой добротности резонатора.

Результаты анализа свидетельствуют, что АЧХ и ФЧХ КР без сосредоточенных элементов связи с нагрузкой идентичны характеристикам эквивалентной схемы — параллельного контура, если резонатор возбуждается симметрично расположенными одинаковыми источниками тока, число которых исключает возможность вынужденных колебаний на ближайших к рабочему высших видах. Следовательно, применение модели параллельного контура для расчета характеристик МЛК в данном случае вполне оправданно.

Рассмотрим случай возбуждения КР одним источником тока, расположенным в сечении А-А (см. рис. 1). КР можно представить в виде бесконечной последовательности четырехполюсников, причем на длине кольца расположен один четырехполюсник. Для такой схемы $N=1$, $I_1=I_0$, $I_2=I_3=\dots=I_N=0$. Напряжение в сечении резонатора, расположенном на расстоянии x от нулевого сечения по средней линии, определяется выражением

$$\begin{aligned} U_x &= U_1 ch \gamma x - I_{1ex} Z_3 sh \gamma x, \\ I_x &= I_{1ex} ch \gamma x - \frac{U_1}{Z_3} sh \gamma x. \end{aligned} \quad (6)[2]$$

Решая систему уравнений (1) при $N=1$, получаем выражение для напряжения в произвольном сечении резонатора:

$$U_x = \frac{I_0 Z_3}{2} \cdot \frac{sh \gamma (L-x) + sh \gamma x}{ch \gamma L - 1}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) полученные ранее выражения для Z_3 , α и β , рассчитаем АЧХ и ФЧХ резонатора в различных радиальных сечениях. На рис. 3 показаны результаты расчета АЧХ и ФЧХ ре-

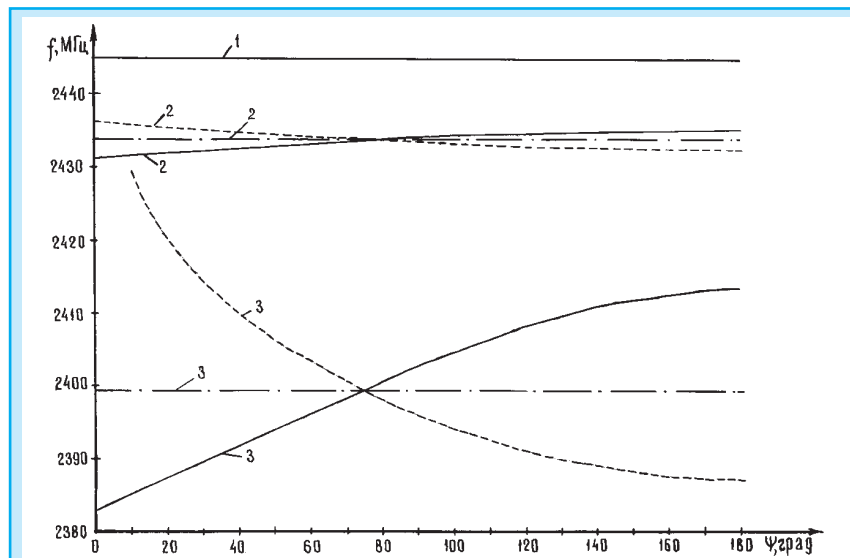


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты основного вида колебаний от угла
 (— частота, соответствующая максимуму амплитуды поля;
 - - - частота, при которой сопротивление резонатора чисто; активное;
 - · - частота резонатора при симметричном возбуждении):
 1. $\sigma=5,8 \cdot 10^4$ См/м, $Q=241$; 2. $\sigma=5,8 \cdot 10^3$ См/м, $Q=76$; 3. $\sigma=5,8 \cdot 10^2$ См/м, $Q=24$

зонатора, образованного волноводом с критической частотой 2450 МГц и длиной кольца 236 мм при удельной проводимости стенок $\sigma=5,8 \cdot 10^3$ См/м. Расчет проведен в диапазоне частот от 2300 до 2800 МГц для трех сечений резонатора: $x=0$ ($\psi=0^\circ$) — графики 1; $x=59$ мм ($\psi=90^\circ$) — графики 2 и $x=118$ мм ($\psi=180^\circ$) — графики 3. Под углом ψ подразумевается угол между рассматриваемым сечением и нулевым (А-А):

$$\psi = \frac{360^\circ \cdot x}{L}. \quad (8)$$

Анализ результатов расчета АЧХ и ФЧХ при различных значениях удельной проводимости стенок позволяет сделать ряд выводов. При высокой добротности АЧХ- и ФЧХ-колебаний рабочего вида одинаковы в различных сечениях КР. Однако когда добротность ниже 100, АЧХ и ФЧХ в разных сечениях заметно различаются (рис. 3) несмотря на то, что в резонаторе нет сосредоточенной нагрузки, как в случае, рассмотренном в работе [1]. Кроме того, из рис. 3 следует, что АЧХ и ФЧХ не симметричны относительно резонансной частоты.

Рис. 4–6 иллюстрируют изменения характеристик КР, рассчитанных по предлагаемой методике, в зависимости от угла ψ и удельной проводимости стенок (добротности резонатора). На рис. 4 видно, что частоты, соответствующие максимуму амплитуды поля (непрерывные линии), и частоты, при которых шунтовое сопротивление резонатора чисто активное ($\varphi=0$), не

совпадают. Штрих-пунктиром показаны значения частот при симметричном возбуждении резонатора 20 источниками тока (2). Также различны в разных сечениях максимальные значения модуля шунтового сопротивления (рис. 5). Важно отметить, что и величина характеристического сопротивления, определяемая выражением (5), не одинакова для различных значений добротности и угла ψ . Более того, в зависимости от ψ изменяется и добротность резонатора (рис. 6).

Заметим, что при угле $\psi=75^\circ$ АЧХ и ФЧХ рабочего вида практически симметричны. Значения частоты резонанса, добротности и модуля шунтового сопротивления более всего соответствуют характеристикам колебаний рабочего вида при симметричном возбуждении резонатора (см. рис. 3).

Таким образом, при несимметричном возбуждении КР его характеристик существенно отличаются от характеристик параллельного контура. Очевидно, что эти отличия обусловлены, в основном, сложением колебаний рабочего вида и ближайших высших видов, у которых присутствуют вариации поля по азимуту. Увеличение длины кольца при неизменной частоте рабочего вида колебаний сближает частоты высших видов колебаний и усиливает искажения АЧХ и ФЧХ. Это отражено на рис. 7, где приведен результат расчета АЧХ и ФЧХ резонатора с длиной кольца, удвоенной по сравнению с резонатором, рассмотренным ранее (рис. 3–6).

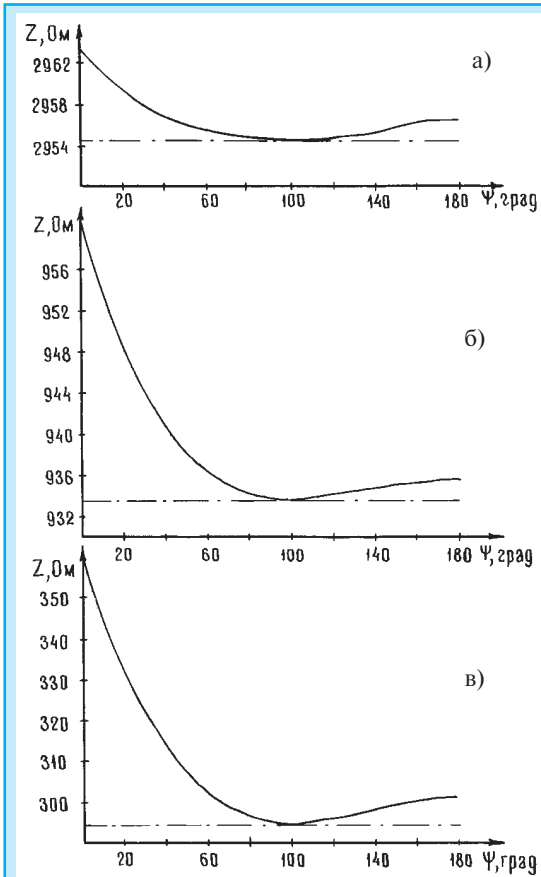


Рис. 5. Зависимость максимальных значений модуля шунтового сопротивления от угла
 (— возбуждение резонатора одним источником тока; - - - симметричное возбуждение резонатора):
 а) $\sigma=5,8 \cdot 10^4 \text{См/м}$, $Q=241$;
 б) $\sigma=5,8 \cdot 10^3 \text{См/м}$, $Q=76$; в) $\sigma=5,8 \cdot 10^2 \text{См/м}$, $Q=24$

Численный анализ показывает, что чем ближе по частоте высшие виды колебаний к рабочему, тем больше отклонение АЧХ и ФЧХ резонатора от характеристик параллельного контура. Возбуждение резонатора N симметрично расположенными одинаковыми источниками тока устраняет колебания на $(N-1)$ ближайших высших видах. Поэтому чем больше симметрично расположенных источников тока возбуждают КР, тем точнее его характеристики совпадают с характеристиками параллельного контура. Однако высшие виды колебаний могут быть обусловлены сосредоточенными элементами связи с внешней нагрузкой, как в случае, рассмотренном в работе [1], даже если возбуждение резонатора полностью симметрично.

Эксперимент

Цель эксперимента — сравнение результатов расчета характеристик КР по предлагаемой методике с результатами измерений. Рассматривались характеристики, описываемые форму-

лой (7), поскольку в процессе исследований резонатор возбуждался одним зондом. Макет представлял собой H-образный волновод, свернутый в кольцо с длиной по средней линии 236 мм. Критическая частота волновода — 2527 МГц, длина зазора взаимодействия — 15 мм. Резонатор исследовался на низком уровне мощности с помощью двух зондов: возбуждающего и детекторного с квадратичной характеристикой. Анализировались рабочий (низший) и два ближайших высших вида колебаний, у которых по длине кольца — соответственно один и два периода поля. Сравнивались рассчитанные и измеренные на макете частоты резонансов, относительные изменения шунтового сопротивления резонатора в различ-

ных сечениях. Абсолютные значения шунтового сопротивления не сопоставлялись, поскольку математическая модель рассматривает прямоугольный волновод.

Сначала были замерены характеристики резонатора без поверхностного поглотителя. Частоты резонансов — $f_0=2527$ МГц, $f_1=2827$ МГц, $f_2=3585$ МГц. Добротность рабочего вида колебаний — 2136. Характеристики рабочего вида колебаний для всех радиальных сечений резонатора одинаковы.

С помощью рассмотренной методики была подобрана математическая модель (7) резонатора с частотой рабочего резонанса 2527 МГц и добротностью рабочего вида колебаний 2136. Частота подбиралась варьированием ширины волновода,

а добротность — путем изменения значений удельной проводимости стенок. Рассчитанные частоты резонансов высших видов колебаний — $f_1=2829$ МГц, $f_2=3586$ МГц.

Затем одну из крышек резонатора покрыли альсифером, после чего измеряли характеристики рабочего вида колебаний при трех положениях детекторного зонда: $x=0$, $x=58,9$ мм (четверть длины кольца) и $x=119$ мм (половина длины кольца). Результаты измерений представлены в таблице.

С экспериментальными данными сопоставлялись расчетные, полученные на основании модели (7). В расчетной модели также была изменена добротность за счет удельного сопротивления стенок резонатора. Прочие характеристики остались прежними.

Как следует из таблицы, результаты расчета АЧХ резонаторов, выполненные по предлагаемой методике, близки к измеренным. Различия на 8–9 МГц скорее всего вызваны деформацией крышки резонатора при отжиге альсиферового покрытия. Расхождения между экспериментальными и расчетными величинами уходят частоты и добротности в разных

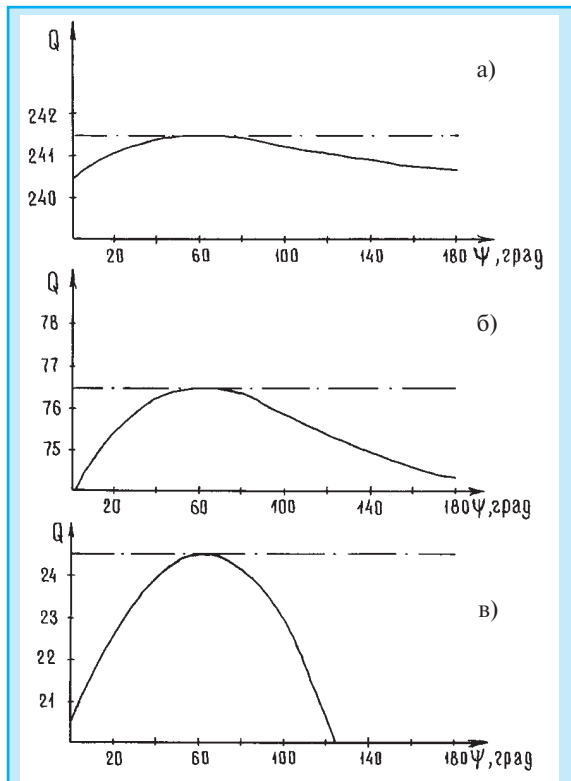


Рис. 6. Зависимость добротности основного вида колебаний по уровню 0,7 от угла Psi
 (— возбуждение резонатора одним источником тока, - - - симметричное возбуждение резонатора):
 а) $\sigma=5,8 \cdot 10^4 \text{См/м}$; б) $\sigma=5,8 \cdot 10^3 \text{См/м}$; в) $\sigma=5,8 \cdot 10^2 \text{Ом/м}$

сечений резонатора не превышают погрешности измерений.

Выводы

Предложенная методика дает хорошие результаты при расчете АЧХ и ФЧХ в различных сечениях КР. Значительная ошибка возникает при определении модуля шунтового сопротивления, поскольку в эквивалентной схеме рассматривается прямоугольный волновод. Если в выражения (2) и (7) подставить формулы для определения Z_s в P - и H -образных волноводах, точность вычисления модуля шунтового сопротивления, видимо, достаточна для использования данной математической модели в программах расчета клистронов, учитывающих взаимодействие полей КР с несколькими неидентичными электронными лучами. Однако сегодня такая задача неактуальна из-за ограниченных возможностей вычислительной техники, имеющейся в распоряжении российских разработчиков клистронов.

Анализ характеристик резонаторов с помощью предложенной методики позволяет сделать ряд выводов относительно измерений параметров и принципов построения клистронов с КР. Например, АЧХ и ФЧХ промежуточных (не связанных с внешней нагрузкой) резонаторов клистрона, возбуждаемых большим числом симметрично расположенных одинаковых электронных лучей, описываются выражением (2). Однако АЧХ и ФЧХ, полученные в процессе измерений характеристик резонаторов посредством двух зондов методом четырехполосника, имеют другой вид, описываемый выражением (6). То есть метод измерений вносит принципиальную погрешность. Она минимальна, если угол между радиальными сечениями, в которых расположены возбуждающий и детекторный зонды, составляет примерно 75° (рис. 4–6). В этом случае влияние ближайших высших видов колебаний проявится менее всего.

Кроме того, с помощью методики

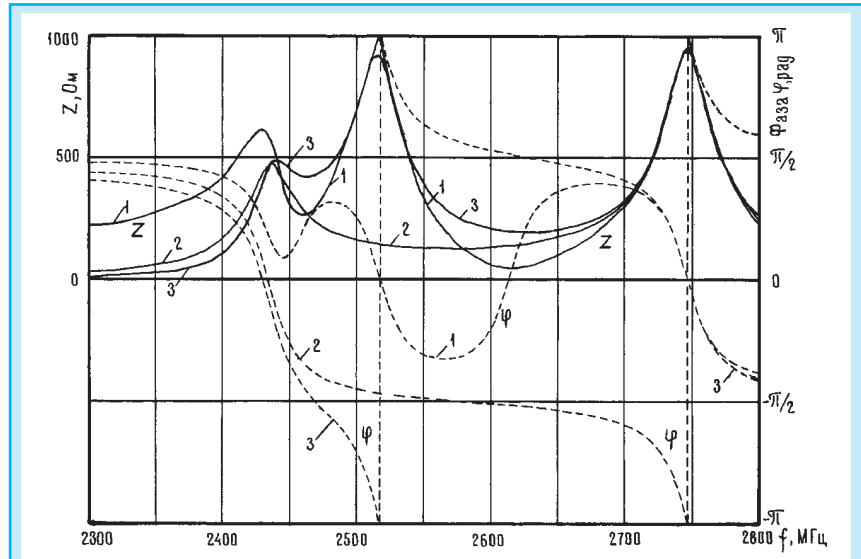


Рис. 7. АЧХ и ФЧХ кольцевого резонатора длиной 472 мм при возбуждении одним источником тока ($\sigma = 5,8 \cdot 10^{-3}$ См/м): 1. $x=0$ мм, $\psi=0^\circ$; 2. $x=118$ мм, $\psi=90^\circ$; 3. $x=236$ мм, $\psi=180^\circ$

можно оценить достижимую полосу рабочих частот клистронов с КР при различных способах возбуждения и нагрузки резонаторов. Если способ возбуждения и нагрузка резонаторов исключают колебания ближайших высших видов (случай, описываемый выражением (2)), широкополосность клистрона с КР ограничивается традиционными для любых клистронов факторами: величиной шунтового сопротивления выходного резонатора, длиной пространства взаимодействия при заданном коэффициенте усиления и т.д. Однако при несимметричном возбуждении и несимметричной нагрузке [1] широкополосность ограничивается еще и тем, что в различных сечениях КР АЧХ и ФЧХ неодинаковы. Причем различия характеристик проявляются тем сильнее, чем ниже добротность КР. Как правило, наиболее нагруженные резонаторы клистронов — выходной и входной. Добротность этих резонаторов обычно не выше $f_o/\Delta f$, где f_o — центральная частота рабочего диапазона, а Δf — диапазон рабочих частот. Из опы-

та проектирования клистронов известно, что вариации амплитуды поля в различных сечениях резонатора не приводят к заметному ухудшению характеристик прибора, если разброс амплитуды не превышает 25%. Из выражения (7) следует, что перепад поля в резонаторе с добротностью $Q_o = f_o/\Delta f$ не превышает 25%, если ширина полосы Δf удовлетворяет выражению $\Delta f < 0,1(f_n - f_o)$, где f_n — резонансная частота ближайшего к рабочему высшему виду колебаний. Частота высшего вида может быть приблизительно рассчитана по формуле

$$f_n = \sqrt{\left(\frac{nc}{L}\right)^2 + f_o^2}, \quad (9)$$

где n — число периодов колебаний на длине кольца, c — скорость света.

При возбуждении резонатора N симметрично расположенными источниками тока (или когда КР связан с нагрузкой N сосредоточенными элементами связи) ближайшим к рабочему виду колебаний оказывается N -й высший вид с N периодами по длине кольца, т.е. $n=N$. Отсюда следует, что допустимая ширина полосы клистрона с КР, при которой перепад амплитуды поля в различных радиальных сечениях резонатора не превышает 25%, может быть оценена по формуле:

$$\Delta f < 0,1 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{nc}{L}\right)^2 + f_o^2} - f_o \right). \quad (10)$$

Данный критерий оценки весьма приблизителен, поскольку не учитывает фазовых искажений, однако полезен на начальном этапе проектирования клистронов с КР.

Измеренные и расчетные характеристики КР в различных сечениях

x, мм	0		58,9		119	
	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
f_m , МГц	2497	2488	2505	2497	2510	2502
Z/Z_m	1	1	0,9	0,9	0,9	0,91
Q	33	35	38	38	33	34

Примечания. При эксперименте частота f_m соответствовала максимуму АЧХ КР на экране панорамного измерителя; Z/Z_m определялось как отношение максимума АЧХ, пропорционального квадрату амплитуды электрического поля в данной точке зазора взаимодействия при резонансе (или квадрату модуля шунтового сопротивления резонатора), к максимуму АЧХ в нулевом сечении. Добротность Q измерялась по уровню 0,5. При расчете f_m соответствует максимуму модуля шунтового сопротивления при данном x; Z — максимальное значение модуля шунтового сопротивления в данном сечении резонатора, Z_m — максимальное значение модуля в нулевом сечении. Добротность резонатора рассчитана по уровню 0,7.

Таким образом, предложенная методика расчета характеристик КР в различных азимутальных сечениях позволяет объяснить и описать ряд их специфических свойств, которые необходимо принимать во внимание при проектировании мощных МЛК с КР. Она может использоваться при разработке математической модели этих приборов, учитывающей неидентич-

ность электронных лучей. С помощью теоретического анализа на основе данной методики получен простой критерий оценки потенциальной широкополосности МЛК с КР, а также определены пути совершенствования методов измерения их характеристик.

Литература

1. Назаров С.Н., Пасманник В.И. Изменение полей и амплитудно-час-

тотных характеристик по углу в нагруженных кольцевых резонаторах. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1983, вып. 4, с. 20—23.

2. Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. Том. I. — М.-Л.: Энергоиздат, 1961, с. 87—92.

3. Левин Л. Теория волноводов / Пер. с англ. под ред. Вольмана В.И. — М.: Радио и связь, 1981, с. 310.

Представляем авторов статьи

Фрейдович Илья Анатольевич. Окончил МИРЭА в 1976 году. Начальник лаборатории ГНПП “Торий” (г. Москва), разработчик ЭВП СВЧ. Автор 24 публикаций, имеет пять авторских свидетельств и патентов РФ. Область научных интересов — сверхмощные ЭВП СВЧ.

Воробьев Михаил Юрьевич. Окончил МИРЭА в 1994 году. Инженер электронных приборов СВЧ в ГНПП “Торий”. Автор двух публикаций. Область научных интересов — сверхмощные ЭВП СВЧ.

Контактный телефон — (095) 332-6888

**Нейрокомпьютерный бум
всерьез
затронет
Россию**

Дайджест

По данным известной прогностической фирмы Dataquest, объем продаж нейрокомпьютеров и программного обеспечения к ним превысил 2 млрд. долл., а рост по отношению к предыдущему году составил около 40%, что позволяет говорить о начале нейрокомпьютерного бума. Не случайно на этот перспективный рынок уже двинулся крупный бизнес, представленный такими гигантами, как Intel, Motorola, Toshiba, Siemens, Texas Instruments и др. Искусственными нейросистемами (ИНС) в мире занимаются около 300 компаний, причем львиная их доля — программным обеспечением. Аппаратурное оснащение пока производят не более 20 компаний, а собственно нейросхемы разрабатывают единицы. Более 50% рынка составляют военные заказы. Однако в последнее время все сильнее ощущается крен в сторону гражданских приложений, прежде всего для финансово-аналитических и биржевых систем. Нейрокомпьютерные системы пока не стали массовым товаром и стоят достаточно дорого — от нескольких десятков тысяч до миллионов долларов. Однако уже сегодня просматриваются два мощных очага массового спроса, способного сбить цены на ИНС: будущий Internet, рождающийся в рамках проекта NGI, и интеллектуализация среды обитания, где ИНС будут управлять всеми бытовыми и функциональными приборами.

Нейросистемный рынок России пока достаточно скромно — по оценкам маркетинговой компании “Тораинфоцентр”, он не превышает 3 млн. долл. Однако российский потенциал для экспансии как на внутреннем, так и на внешнем рынке оценивается достаточно высоко, в первую очередь благодаря заделу, созданному в рамках ВПК и нестандартным путям, которыми вынуждены были идти отечественные математики и конструкторы. К тому же нейросистемный рынок в России только начинает формироваться, и на нем пока нет жесткой конкуренции, которая могла бы помешать российским компаниям занять там достойное положение. А по сравнению с западными продуктами стоимость российских даже при равном качестве, несомненно, будет намного ниже. Исследованиями и нейросистемными приложениями в России занимаются около 20 небольших групп (до 25 человек). Наиболее плодотворно работают московские фирмы “Инструментальные системы” и ТРИНИТИ, группа в ФИАНе, а также лаборатории в Арзамасе, Красноярске, Ростове-на-Дону и Новосибирске. Аппаратную поддержку нейротехнологий производят лишь три организации. И только одна компания — НТЦ “Модуль”, созданная на базе главного вычислительного центра корпорации “Вымпел”, выполняет весь комплекс работ — от исследований до программно-аппаратных реализаций ИНС. Наиболее известны такие продукты НТЦ, как ускорительные платы, которые при подключении к обычному ПК существенно ускоряют выполнение программных нейроалгоритмов и превращают его, по сути, в нейрокомпьютер. Но главное достижение “Модуля” — собственный нейропроцессор, который при тестировании по всем параметрам (по некоторым — в десятки раз) превзошел ближайшие аналоги фирм Intel и Texas Instruments. Поскольку нейропроцессор спроектирован как универсальное устройство, он применим и для ПК, и для мощных вычислительных сетей. Сейчас первая партия этих изделий изготавливается на заводе Samsung в Южной Корее.

Согласно прогнозу, в 2010 году отечественные компьютерные и информационные технологии могут выйти на уровень продаж в 4,6 млрд. долл. Возможно, прогноз будет существенно скорректирован в сторону увеличения. Но это во многом будет зависеть от того, будут ли признаны нейротехнологии приоритетными для России.

Финансовые известия, 1998, №15

**А
Н
О
Н
С**

Ионная сверхпроводимость при температурах вплоть до 400—800°C — это возможно!

Так считает известный новосибирский специалист в этой области В. Иоффе. Если его теоретические построения подтвердятся экспериментально, во многих отраслях (электроника, машиностроение, энергетика...) может произойти новая техническая революция.

Читайте об этом в следующем номере нашего журнала