

Добротность резонансной линии клинотронов миллиметрового диапазона

Е. Е. Лысенко, О. Ф. Пишко, В. Г. Чумак, С. А. Чурилова

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

Статья поступила в редакцию 29 мая 2001 г.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований нагруженной добротности возбуждаемых мод замедляющей системы клинотронов миллиметрового диапазона. Описанная методика измерений позволила впервые получить значения добротности, необходимые как при расчете характеристик приборов, так и для оценки качества замедляющих систем. Показано, что в отсутствие нагрузки на коллекторном конце замедляющей системы в случае малых коэффициентов отражения добротность достигает значения порядка сотни единиц, что позволяет при непрерывной полосе перестройки приборов $\sim 10 + 15\%$ получать повышенный уровень выходной мощности, КПД и стабильности частоты. Результаты работы могут быть использованы при разработке приборов с длительным взаимодействием "О" и "М" типа.

У роботі наведено результати експериментальних досліджень навантаженої добротності збуджених мод сповільнюючої системи клінотронів міліметрового діапазону. Описана методика вимірювань дозволила вперше одержати значення цієї добротності, необхідні як для розрахунків характеристик приладів, так і для оцінки якості сповільнюючих систем. Показано, що при відсутності навантаження на колекторному кінці сповільнюючої системи у випадку малих коефіцієнтів відбиття добротність сягає значення порядку сотні одиниць, що дозволяє при безперервній смузі перестроювання приладів $\sim 10 \div 15\%$ одержувати підвищений рівень вихідної потужності, ККД та стабільності частоти. Результати роботи можна використовувати при розробці приладів з тривалою взаємодією "О" та "М" типу.

Введение

В генераторах типа ЛОВ, к которым относится клинотрон, наличие согласованной поглощающей нагрузки на коллекторном конце замедляющей системы (ЗС) и согласованный вывод энергии из пространства взаимодействия обеспечивают широкую полосу перестройки приборов, частотно-вольтовая характеристика которых не имеет волнистости. Это относится также к зависимостям пускового тока и генерируемой мощности от ускоряющего напряжения [1]. Нарушение условий согласования и отсутствие нагрузки приводят

к увеличению коэффициента отражения от пушечного и коллекторного концов прибора, что влечет за собой изменение характеристик генератора.

В случае больших коэффициентов отражения (коэффициент стоячей волны КСВН > 3) в перечисленных выше характеристиках появляются разрывы. Такие ЛОВ и клинотроны называются резонансными и характеризуются малой длиной ЗС, пониженным пусковым током, повышенным уровнем выходной мощности и КПД, большей стабильностью частоты [2-7].

В случае малых коэффициентов отражения (КСВН < 3) характеристики прибора приоб-

ретают волнистость, наблюдаемую практически во всех нерезонансных приборах типа ЛОВ из-за сложности обеспечения условий идеального согласования [1, 2].

В клинотронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн используются гребенчатые ЗС, не имеющие поглощающей нагрузки на коллекторном конце. Несмотря на это за счет потерь в ЗС при длине системы порядка 20 мм представляется возможным обеспечить КСВН ≤ 3 и получить полосу перестройки приборов $\sim 10 \div 15\%$ без разрывов частотной характеристики при повышенном уровне выходной мощности и стабильности частоты.

ЗС с отражениями на концах представляет собой резонатор поверхностной волны, характеризующийся добротностью возбуждаемых мод, связанных с длиной ЗС. В работах [5, 6] такая добротность называется добротностью резонансной линии (Q_n). Значения этой добротности необходимо знать при расчете пусковых токов и рабочих характеристик ЛОВ и клинотронов [5-7].

В случае больших коэффициентов отражения, приводящих к разрыву частотной характеристики, Q_n можно определить экспериментально по известным методикам определения добротности резонаторов. Одна из возможных методик для определения Q_n резонансной ЛОВ описана в работе [5]. В ней зависимость мощности от частоты рассматривается как резонансная кривая ЗС, и добротность определяется по известной формуле:

$$Q_n = \frac{f_0}{2\Delta f}, \quad (1)$$

где f_0 – резонансная частота, $2\Delta f$ – ширина кривой по частоте на уровне половинной мощности. При малых коэффициентах отражения воспользоваться приведенной выше формулой не представляется возможным, и нам не известны работы, в которых экспериментально определены значения добротности возбуждаемых мод ЗС в приборах типа ЛОВ в этом случае.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по

оценке нагруженной добротности возбуждаемых мод ЗС в клинотронах миллиметрового диапазона длин волн при КСВН ≤ 3 . В целях единства терминологии и краткости при изложении материала будем использовать определение “добротность резонансной линии” (Q_n).

1. Постановка эксперимента и обсуждение результатов

При изучении существующих методов измерения нагруженной добротности “холодных” магнетронов обращает на себя внимание метод, описанный в [8]. Он основан на определении добротности резонаторов, имеющих один вход, по зависимости КСВН k от частоты f вблизи резонанса. При этом магнетрон подключается к измерительному тракту как оконечная нагрузка и измеряются резонансная частота f_0 и КСВН k_0 в этой точке. Затем измеряются частоты f_1 и f_2 , соответствующие некоторому выбранному уровню КСВН k_x (рис. 1). Измеренные значения частот и КСВН позволяют определить нагруженную добротность магнетрона:

$$Q_n = \frac{\sqrt{(k_x - k_0)(k_0 - 1/k_x)}}{k_0 + 1} \frac{f_0}{f_2 - f_1}. \quad (2)$$

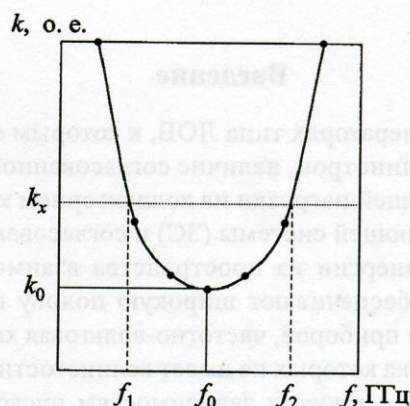


Рис. 1. Схематический рисунок зависимости КСВН резонатора от частоты вблизи резонанса

Если известна нагруженная добротность, можно рассчитать собственную и внешнюю добротности, затягивание частоты и контурный КПД.

Обычно измерения проводились с применением измерительной линии, однако успешно используются и панорамные измерители КСВН.

Для определения добротности резонансной линии в клинотронах миллиметрового диапазона применялась описанная выше методика. Исследования проводились в нескольких участках частотного диапазона от 40 до 118 ГГц на панорамных измерителях КСВН типа Р2-65, Р2-69 и РР2-01. Для сравнения в отдельных точках добротность определялась с помощью измерительной линии. Кроме того, результаты “холодных” измерений сопоставлялись с рабочими характеристиками клинотронов (“горячие” измерения), в частности, с характером зависимости мощности от частоты в полосе перестройки.

Остановимся подробно на измерениях в диапазоне $53.3 \div 78.3$ ГГц с использованием панорамного измерителя КСВН типа Р2-69. В режиме панорамного измерения КСВН к волноводному измерительному тракту прибора Р2-69 подключались различные исследуемые объекты: образцы клинотронов, работающих в указанном диапазоне, а также макет клинотрона, в котором предусмотрена возможность замены ЗС. Зависимости КСВН от частоты для этих объектов (наблюдаемые на экране Р2-69 осциллограммы) приведены на рис. 2. На рис. 2, а, б, в представлены осциллограммы для макета клинотрона, в котором установлены: а) вместо ЗС гладкая металлическая пластина таких же размеров (заготовка ЗС), б) гребенчатая ЗС с шагом $d = 0.4$ мм и глубиной щелевого резонатора $h = 1.06$ мм; в) ЗС с $d = 0.35$ мм, $h = 0.9$ мм. На рис. 2, г приведена осциллограмма для клинотрона с ЗС, имеющей $d = 0.4$ мм, $h = 1.06$ мм. На осциллограммах числа указывают диапазон исследования по частоте и частоту ($f = 65.3$ ГГц), соответствующую π -виду для ЗС с $d = 0.4$ мм, $h = 1.06$ мм; линии с частотной меткой $f = 65.38$ Гц отмечают минимальный (нижняя линия) и максимальный (верхняя) уровень КСВН: $k = 1.6$ и $k = 3.15$ соответственно. На осциллограммах четко

прослеживаются области возбуждения ЗС: резонансность ЗС по длине приводит к существенно большей изрезанности зависимости КСВН от частоты $k(f)$ в полосе возбуждения (рис. 2, б, в), чем в случае макета с металлической пластиной, установленной вместо ЗС (рис. 2, а). Причем положение областей возбуждения ЗС на шкале частот изменяется в зависимости от геометрии системы (рис. 2, б, в). Одновременно проводилось измерение частот резонансов ЗС (частоты в минимумах КСВН в полосе возбуждения) и сравнение с результатами расчета резонансных частот возбуждаемых мод по длине ЗС [6]. До сдвига фазы $\psi > 0.6\pi$ на шаге системы количество резонансов и значения резонансных частот в обоих случаях практически соответствуют друг другу. При $\psi > 0.6\pi$ количество резонансов, наблюдаемых в эксперименте, уменьшается, что, по-видимому, связано с приближением к π -виду, где отдельные резонансы сложно различить из-за их сгущения. Соответствие экспериментальных и расчетных резонансных частот указывает на то, что определение добротности полученных в эксперименте резонансов адекватно определению добротности резонансов возбуждаемых мод, т. е. добротности резонансной линии.

Для определения Q_n описанным выше методом на осциллограмме выделялся отдельный резонанс и определялась частота f_0 и КСВН k_0 в точке минимума зависимости $k(f)$, а также частоты f_1 и f_2 на некотором уровне КСВН k_x . На рис. 3 приведена осциллограмма, по которой определялась добротность на частоте $f_0 = 69.9$ ГГц. Верхняя линия соответствует уровню $k_x = 2.3$, метка на линии – частоте $f_2 = 70.05$ ГГц. Добротность Q_n вычислялась по формуле (2). В качестве примера на рис. 4 приведены значения Q_n для макета с ЗС, имеющей $d = 0.4$ мм, $h = 1.06$ мм. В диапазоне частот $55.02 \div 64.58$ ГГц (сдвиг фазы $\psi = (0.32 \div 0.72)\pi$ на шаге системы) КСВН для ЗС без нагрузки не превышал значения $k = 3$. Видно, что Q_n изменяется в пределах от нескольких десятков до сотни единиц (кривая 1). Аналогичные значения Q_n были получены для ЗС с $d = 0.35$ мм, $h = 0.9$ мм и для различных образцов клинотронов.

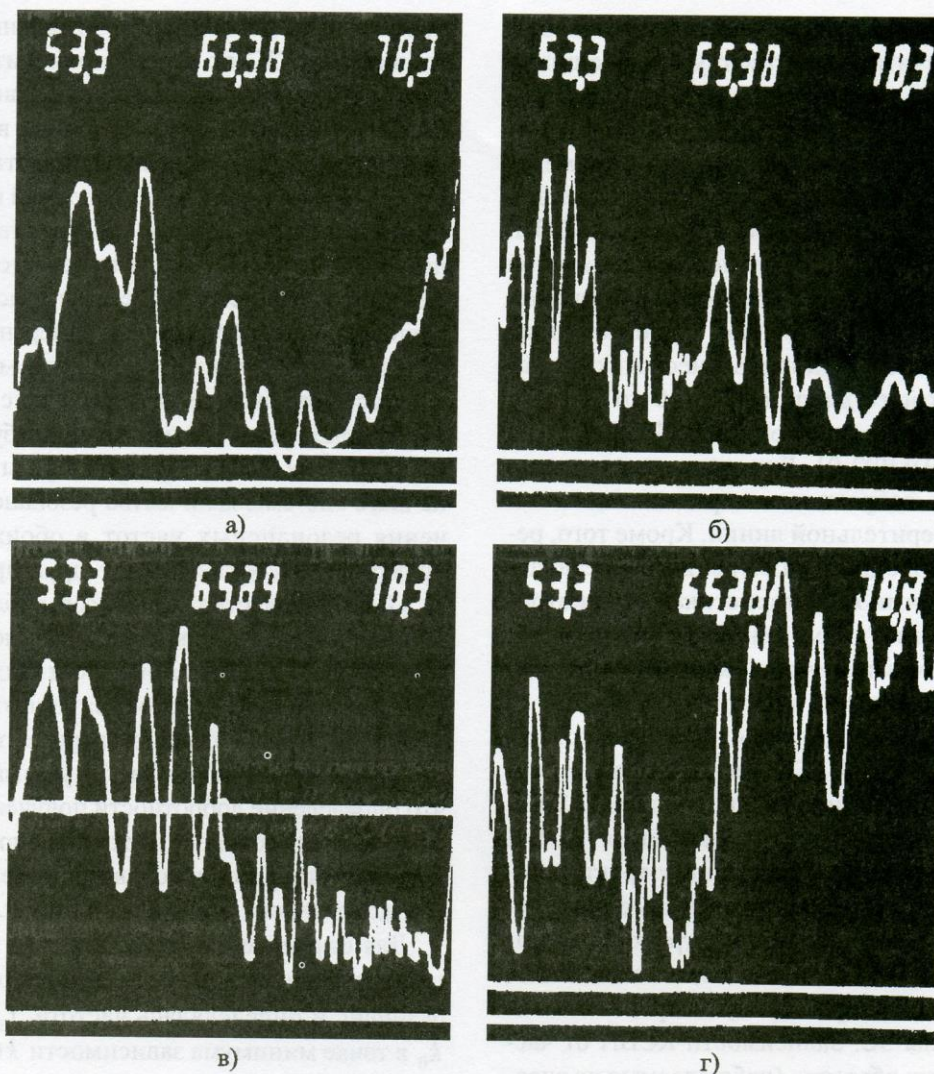


Рис. 2. Зависимости КСВН от частоты для исследуемых объектов: а) макет клинотрона с заготовкой ЗС; б) макет с гребеночной ЗС (шаг $d = 0.4$ мм, глубина щелевого резонатора $h = 1.06$ мм); в) макет с ЗС ($d = 0.35$ мм, $h = 0.9$ мм); г) клинотрон с ЗС ($d = 0.4$ мм, $h = 1.06$ мм)

Если коллекторный конец ЗС в макете согласовывался с применением поглощающей нагрузки (керографит), то, как и следовало ожидать, измеренная добротность Q_L в полосе возбуждения ЗС ($f \leq 65$ ГГц) уменьшалась (кривая 2), отдельные резонансы вообще не наблюдались, а вне полосы возбуждения ($f > 65$ ГГц) Q_L практически не изменялась.

Для образцов клинотронов проводились как “холодные”, так и “горячие” измерения. На рис. 5 приведены результаты исследования клинотрона с ЗС, имеющей $d = 0.4$ мм,

$h = 1.06$ мм, осциллограмма зависимости $k(f)$ которого представлена на рис. 2, г. Кривая 1 – зависимость выходной мощности от частоты, числами на максимумах кривой указаны значения добротностей, определенные с помощью “холодных” измерений. На линиях 2, 3, 4 для наглядности точками нанесены значения частот, определяющие соответственно максимумы мощности, минимумы зависимости $k(f)$ на “холодных” измерениях и расчетные резонансные частоты возбуждаемых мод по длине ЗС.

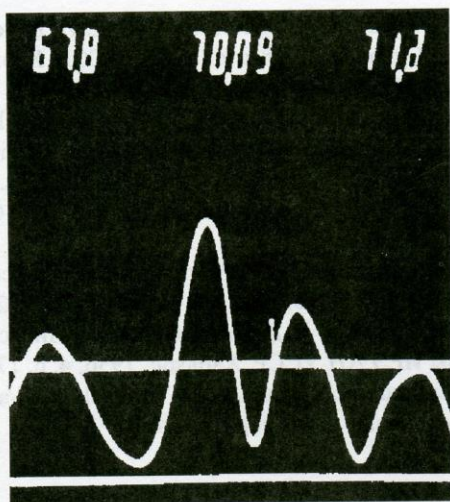


Рис. 3. Резонансы, выделенные для определения добротности

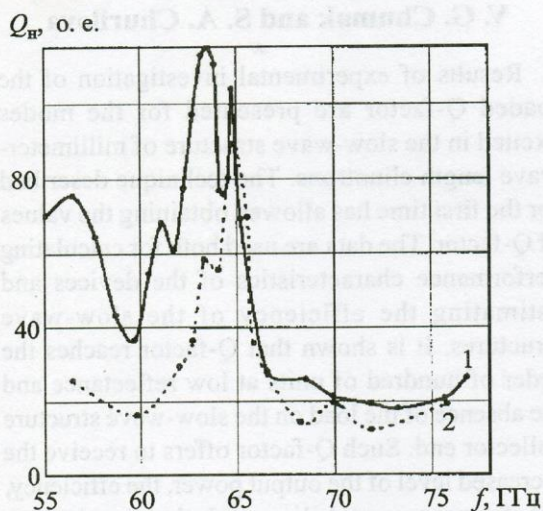


Рис. 4. Зависимость добротности от частоты для макета клинотрона: 1 – ЗС без поглощающей нагрузки; 2 – ЗС с поглощающей нагрузкой

Видно, что максимумы мощности по частоте практически соответствуют минимумам значений КСВН на “холодных” измерениях и расчетным резонансным частотам ЗС при $f \leq 63.3$ ГГц ($\psi \sim 0.65\pi$). Когда $\psi > 0.65\pi$, частоты расчетных резонансов сильно сгущаются, экспериментальные точки соответствуют только отдельным расчетным частотам, что

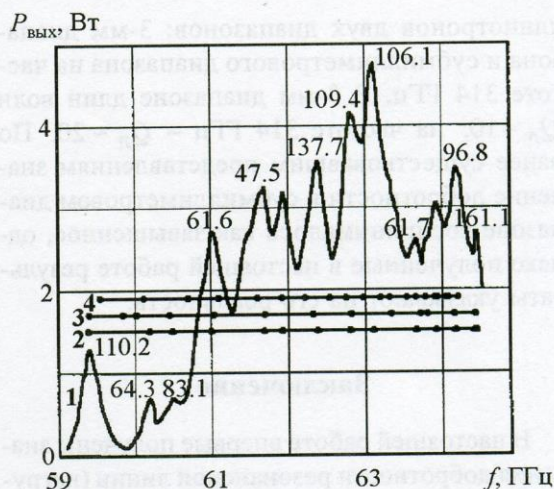


Рис. 5. Характеристики клинотрона: 1 – зависимость мощности от частоты; точки на линии 2 – частоты, соответствующие максимумам мощности; точки на линии 3 – частоты, соответствующие резонансам на “холодных” измерениях; на линии 4 – расчетные частоты резонансов возбуждаемых мод по длине ЗС. Числами на кривой 1 указаны значения Q_n клинотрона.

может быть связано с приближением к π -виду. Добротность некоторых мод с помощью “холодных” измерений определить не удастся, т. к. на зависимости КСВН от частоты резонансная кривая слабо выражена. Тем не менее можно сделать вывод, что нагруженная добротность возбуждаемых мод в клинотроне с ЗС без нагрузки в исследуемом диапазоне изменяется от нескольких десятков до сотни. Измеренные значения добротности в 5-мм и 3-мм диапазонах длин волн близки к приведенным выше, в 8-мм диапазоне – $Q_n > 100$.

Полученные значения добротности представляют самостоятельный интерес, т. к. ранее экспериментально не определялись. Кроме того, в последнее время появились работы по теории клинотрона как резонансного прибора, для определения характеристик которого необходимо знать величину нагруженной добротности резонансных мод [7, 9]. Результаты настоящей работы обеспечивают такие возможности. В работах [7, 9] Q_n была определена расчетным путем исходя из экспериментальных значений пускового тока для

клинотронов двух диапазонов: 3-мм диапазона и субмиллиметрового диапазона на частоте 314 ГГц. В 3-мм диапазоне длин волн $Q_{\text{л}} \sim 10$, на частоте 314 ГГц – $Q_{\text{л}} \sim 20$. По ранее существовавшим представлениям значение добротности в субмиллиметровом диапазоне воспринималось как завышенное, однако полученные в настоящей работе результаты указывают на его реальность.

Заключение

В настоящей работе впервые получены значения добротности резонансной линии (нагруженной добротности возбуждаемых мод замедляющей системы) приборов с длительным взаимодействием при КСВН ≤ 3 . Исследования, проведенные практически во всем миллиметровом диапазоне длин волн, показали, что добротность достигает величины порядка сотни единиц. Это позволяет при непрерывной полосе перестройки приборов $\sim 10 \div 15 \%$ получить повышенный уровень выходной мощности, КПД и стабильности частоты.

Кроме того, описанная методика дает возможность определять значения добротности резонансной линии приборов указанного класса на “холодных” измерениях и использовать их для расчета пусковых и рабочих характеристик приборов.

Литература

1. Ю. Г. Альшuler, А. С. Татаренко. Лампы малой мощности с обратной волной. Москва, Сов. радио, 1963, 296 с.
2. Г. Я. Левин, А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко, А. Я. Усиков, С. А. Чурилова. Клинотрон. Киев, Наук. думка, 1992, 200 с.
3. Б. П. Ефимов, А. Я. Кириченко, А. П. Бужинский. Труды ИРЭ АН УССР. Харьков, 1967, №15, с. 141-157.

4. Б. П. Ефимов, А. П. Касьяненко, Л. И. Коротун, А. Н. Суворов. Труды ИРЭ АН УССР. Харьков, 1970, №18, с. 169-175.
5. Heynisch. Der Resonanz – Ruckwartswellen – Oszillator, ein Generator fur Mikrowellen, Archiv der ebkrischen Ubertragung. 1960, Bd, 14, Hf, 12, s. 531.
6. В. А. Париров. Эл. техника, с.1. Электроника СВЧ. 1966, №8, с. 20-38.
7. K. Schünemann, D. M. Vavriv. IEEE Transactions on Electron Devices. 1999, 46, No. 11, pp. 2245-2252.
8. Е. М. Кулешов, Д. Д. Литвинов, М. С. Яновский. Труды ИРЭ АН УССР. Харьков, 1956, 4, с. 177.
9. S. Manzhos, K. Shünemann, S. Sosnitsky, D. Vavriv. Радиофизика и радиоастрономия. 2000, 5, №3, с. 265-273.

Resonance Line Q-Factor of Millimeter-Wave Clinotron

Ye. Ye. Lysenko, O. F. Pishko,
V. G. Chumak and S. A. Churilova

Results of experimental investigation of the loaded Q-factor are presented for the modes excited in the slow-wave structure of millimeter-wave length clinotrons. The technique described for the first time has allowed obtaining the values of Q-factor. The data are used both for calculating performance characteristics of the devices and estimating the efficiency of the slow-wave structures. It is shown that Q-factor reaches the order of hundred of units at low reflectance and the absence of the load on the slow-wave structure collector end. Such Q-factor offers to receive the increased level of the output power, the efficiency, the frequency stability and the continuous frequency band about $10 \div 15 \%$. The results presented can be used in the development of the devices with the long-duration beam-surface-wave interaction of the “O” and “M”-type.