

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПОЛОСЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В КЛИНОТРОНЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В. Г. Чумак, С. В. Паньков

Радиоастрономический институт НАН Украины

4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина

E-mail: pishko@rian.kharkov.ua

Приведены результаты исследований возможности расширения полосы непрерывной перестройки частоты в рабочем диапазоне клинотрона. Наиболее предпочтительным способом является оптимизация полости резонатора поверхностной волны прибора. Изменяя расстояние между замедляющей системой и противоположной стенкой в резонаторе, можно обеспечить непрерывную полосу перестройки до 20–25 %. Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: клинотрон, миллиметровый диапазон, вакуумные приборы, полоса перестройки частоты.

Клинотрон представляет собой модификацию лампы обратной волны (ЛОВ) миллиметрового (мм) и субмиллиметрового (субмм) диапазонов длин волн [1].

В настоящее время имеется большое количество опубликованных работ, посвященных расчету основных характеристик клинотрона и ЛОВ О-типа [2–7]. Тем не менее, эти работы не могут охватить всего многообразия задач, встречающихся в практике разработки прибора. Поэтому для разработки клинотронов, как и других приборов СВЧ, большое значение имеют экспериментальные методы определения отдельных характеристик.

Одной из таких характеристик, которую можно не только определять, но и моделировать с помощью эксперимента, является полоса непрерывной электрической перестройки частоты, которую, как правило, стараются обеспечить более широкой с сохранением основных параметров. В частности, о полосе перестройки СВЧ прибора по частоте судят по данным «холодных» измерений. Клинотрон является резонансным прибором, так как не имеет элементов согласования на концах замедляющей системы (ЗС), однако за счет потерь в ней он обладает достаточно широкой полосой электрической перестройки. В случае больших отражений может наблюдаться срыв генерации, который нельзя устранить улучшением условий взаимодействия пучка с электромагнитным полем ЗС (увеличением плотности тока, напряженности магнитного поля и т. д.). Как показывает практика, частотная характеристика без разрывов в широкополосной ЛОВ наблюдается при значениях коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в выходном волноводе ≤ 2 [2]. В клинотроне при КСВН ≤ 3 удается получить полосу перестройки приборов $\sim 10\div 15\%$ без разрывов частотной характеристики при повышенном уровне выходной мощности и стабильности частоты. При КСВН > 3 в частотной характеристике клинотрона появляются разрывы [3], что ограничивает использование приборов.

Величину КСВН можно измерить в выходном волноводе уже собранного прибора и по этим измерениям прогнозировать ширину полосы перестройки и ее непрерывность.

Данная работа посвящена выяснению возможности расширения полосы непрерывной перестройки частоты клинотрона за счет некоторых изменений конструкции прибора. Первый вариант предполагает применение настроечного поршня в конструкции вывода СВЧ энергии, второй вариант – моделирование полости резонатора поверхностной волны прибора за счет изменения расстояния между ЗС и противоположной стенкой при неизменной длине.

1. Влияние настроечного поршня на полосу электрической перестройки частоты клинотрона. Возможность расширения непрерывной полосы перестройки прибора исследовалась путем согласования вывода энергии из пространства взаимодействия с помощью настроечного поршня, который применяется в некоторых конструкциях генераторов типа ЛОВ при отсутствии согласованной поглощающей нагрузки на коллекторном конце ЗС [2].

На рис. 1 показана схема макета клинотрона с настроечным поршнем.

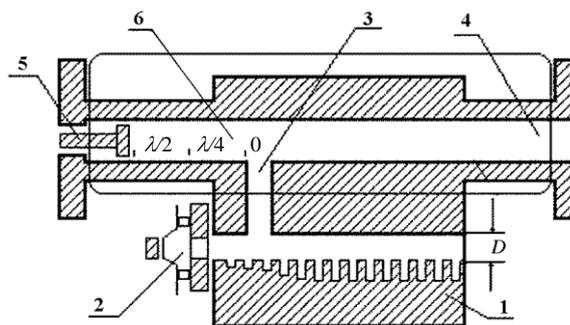


Рис. 1. Схема макета клинотрона с настроечным поршнем: 1 – ЗС; 2 – электронная пушка; 3 – вывод энергии; 4 – выходной волновод; 5 – настроечный поршень; 6 – резонаторная камера

Гребенчатая ЗС (шаг 0,45 мм, глубина щели 1,02 мм) 1 установлена в волноводе шириной 5 мм. Электронная пушка 2 располагается слева от системы. Вывод энергии осуществляется в перпендикулярном электронному потоку направлении с последующим поворотом на 90° так, что выходной волновод 4 расположен параллельно ЗС, между отверстием вывода энергии 3 и корпусом прибора находится резонаторная камера б с настроечным поршнем 5.

Характер изменения КСВН в выходном волноводе для макета клинотрона, схема которого показана на рис. 1, исследовался с помощью панорамного измерителя КСВН типа Р2-69 в частотном диапазоне 53,3–65 ГГц. Зависимости КСВН от частоты f для исследуемого макета приведены на рис. 2. На рис. 2, а показан характер изменения КСВН (f) в рабочем диапазоне для случая, когда настроечный поршень расположен в начале резонаторной камеры. На рис. 2, б, в представлены аналогичные зависимости при рас­положении поршня на расстоянии $\lambda/2$ и $\lambda/4$ от начала резонаторной камеры соответственно, здесь $\lambda = c/f$ – длина волны в центре полосы рабочих частот.

Из рис. 2 видно, что в диапазоне измерений значения КСВН очень велики для всех положений настроечного поршня, и лишь на отдельных небольших участках значения КСВН ≤ 3 . В работе [3] было показано, что для непрерывной работы прибора необходимо обеспечить в полосе генерации КСВН ≤ 3 , поэтому очевидно, что в частотной характеристике данного прибора будут наблюдаться разрывы. Влияние настроечного поршня проявляется в том, что в низкочастотной области диапазона измерений также есть участки, на которых КСВН ≤ 3 . Предположительно, что при настроечном поршне, расположенном на расстоянии $\lambda/2$ (рис. 2, б), возбуждение колебаний возможно на более низких частотах, чем при других положениях поршня (рис. 2, а, в). В высокочастотной области измерений зависимость КСВН (f) практически не изменяется от положения настроечного поршня.

Эти выводы подтвердились при измерении частотной характеристики клинотрона. На рис. 3 приведены результаты измерений частотных характеристик $f(U)$ клинотрона для различных положений настроечного поршня в диапазоне от 54 до 63 ГГц при ускоряющих напряжениях $U = 2000 \div 5500$ В.

Кривая, помеченная (\circ), соответствует положению настроечного поршня в начале резонаторной камеры, а кривая с точками (\bullet) – на расстоянии $\lambda/2$ от ее начала. В обоих случаях наглядно проявляется резонансный характер работы прибора, т. е. он возбуждается на коротких час-

тотных отрезках, «полочках», во всем диапазоне ускоряющих напряжений.

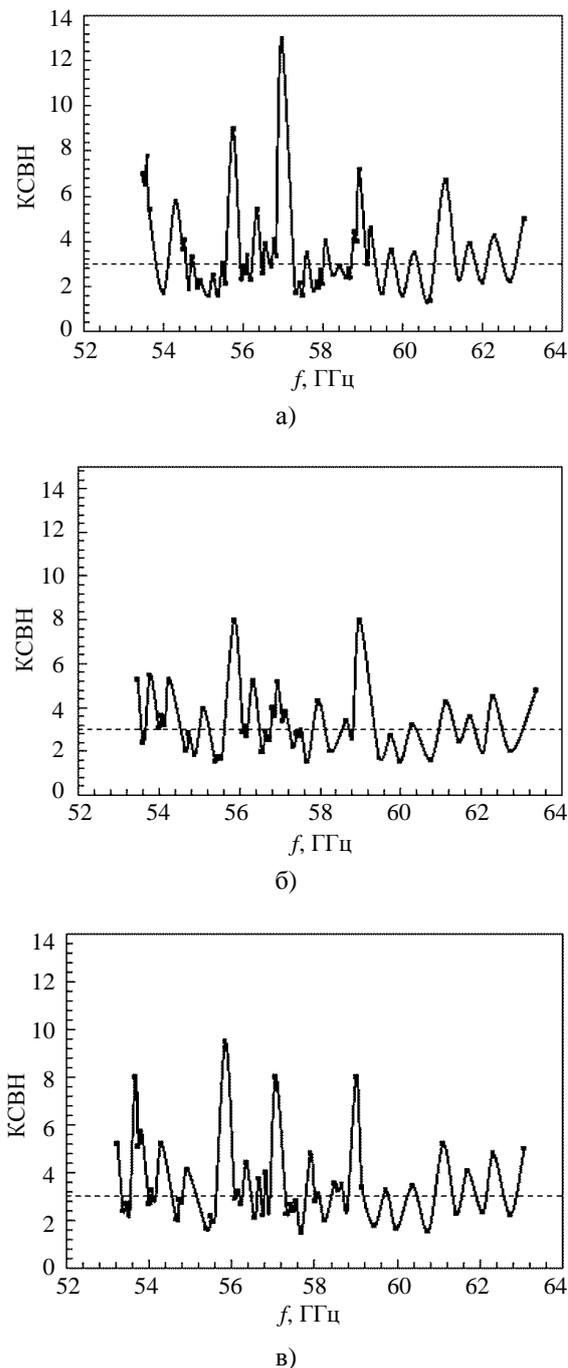


Рис. 2. КСВН (f): а) – поршень расположен в начале резонаторной камеры; б) – на расстоянии $\lambda/2$; в) – на расстоянии $\lambda/4$ (пунктирная линия отмечает уровень КСВН = 3)

Влияние настроечного поршня проявляется только в низкочастотной области работы прибора, в высокочастотной области «полочки» располагаются практически на одной образующей. Как и предполагалось выше, при настроечном поршне, расположенном на расстоянии $\lambda/2$

от начала камеры, частотный диапазон возбуждаемых колебаний расширяется в низкочастотную область работы прибора с разрывами по частоте.

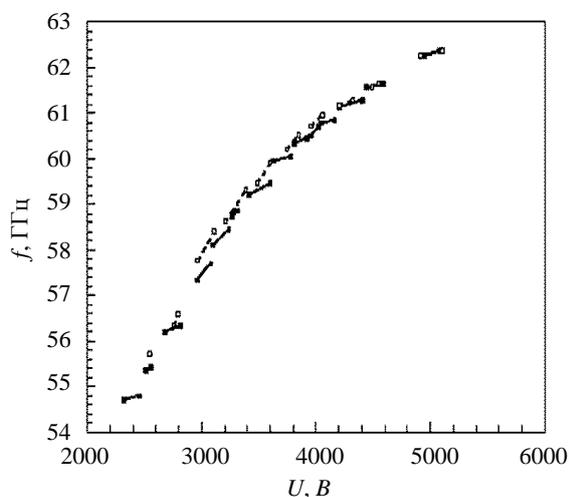


Рис. 3. Частотные характеристики клинотрона с настроенным поршнем в рабочем диапазоне частот $f = 54 \div 63$ ГГц при ускоряющих напряжениях $U = 2000 \div 5500$ В

2. Влияние расстояния между ЗС и противоположной стенкой резонатора на полосу электрической перестройки частоты клинотрона. Возможность расширения непрерывной полосы перестройки прибора исследовалась путем моделирования полости резонатора поверхностной волны при изменении расстояния между ЗС и противоположной стенкой в диапазоне $53,3 \div 78,3$ ГГц с использованием панорамного измерителя КСВН.

К волноводному измерительному тракту прибора Р2–69 в режиме панорамного измерения КСВН подключался макет клинотрона, схематически представленный на рис. 4.

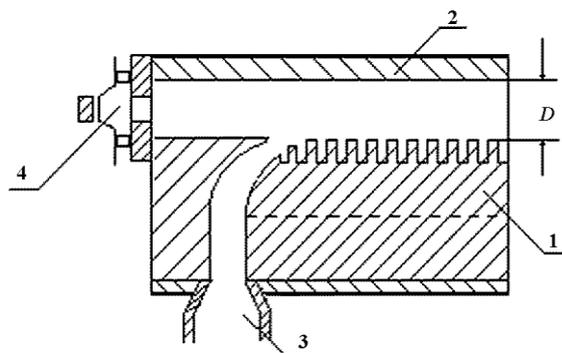


Рис. 4. Схема макета клинотрона: 1 – ЗС; 2 – перемещающаяся стенка; 3 – выходное устройство; 4 – электронная пушка

Гребенчатая ЗС (шаг 0,45 мм, глубина щели 1,02 мм) 1 установлена в волноводе шири-

ной 2,5 мм. Для определения оптимального положения стенка 2 резонатора могла перемещаться перпендикулярно относительно гребенки на расстояние D . В макете клинотрона использовано, как и в работе [1], широкополосное и согласованное с гребенкой выходное устройство 3 с конусным выходным волноводом ($3,6 \times 1,0$) мм² и последующим переходом на стандартное сечение ($3,6 \times 1,8$) мм². Слева от ЗС располагалась электронная пушка 4.

На рис. 5 представлены зависимости КСВН (f) при перемещении стенки резонатора на расстояние D . Обычно в разрабатываемых клинотронах принималось $D \approx 0,4$ мм [1]. При таком расстоянии обеспечивалась непрерывная полоса перестройки 10–15 %.

На рис. 5, а показана эта зависимость для размещения стенки на расстоянии $D = 0,4$ мм. Незначительное смещение стенки в сторону увеличения $D = 0,65$ мм (рис. 5, б) не вносит заметного изменения в характер зависимости КСВН (f) и не влияет на его величину. К наиболее существенному результату приводит смещение стенки на расстояние примерно равное $\lambda/4$ ($D = 1,15$ мм). На рис. 5, в видно, что в этом случае $1,5 \leq \text{КСВН} \leq 2$ в широкой области частот (около 30 %). Можно ожидать, что полоса непрерывной перестройки клинотрона расширится до 20–25 %. Оценка добротности резонансной линии по методике, приведенной в работе [3], показала, что в этом случае добротность мод резонатора без нагрузки ЗС в исследуемом диапазоне изменяется от нескольких десятков до сотни. Это позволит при непрерывной полосе перестройки прибора получить повышенный уровень выходной мощности, КПД и стабильности частоты.

На рис. 5, г приведены результаты измерений КСВН (f) при смещении стенки на расстояние $D = 2,4$ мм ($\lambda/2$), которые указывают на возможность разрывов по частоте в приборе, т. к. в некоторых частотных промежутках КСВН > 3 .

Изменение расстояния D от 1,15 мм ($\lambda/4$) до 2,4 мм ($\lambda/2$), возможно, приведет к расширению области возбуждения колебаний в приборе, но, вероятно так же, что при этом будут наблюдаться разрывы по частоте в рабочем диапазоне.

Для сравнения по указанным в работе методикам измерены КСВН и добротность мод резонатора в ЛОВ ОВ-70 (ГНТЦ «Исток» [9]), которая имела выходную мощность порядка 20 мВт и полосу непрерывной перестройки частоты около 35 %. Во всем рабочем диапазоне прибора КСВН ≤ 2 , чем и вызвана широкая полоса непрерывной перестройки. Добротность возбуждаемых мод $Q = 2,4 \div 13,9$ и, вследствие этого, невысокие уровни выходной мощности.

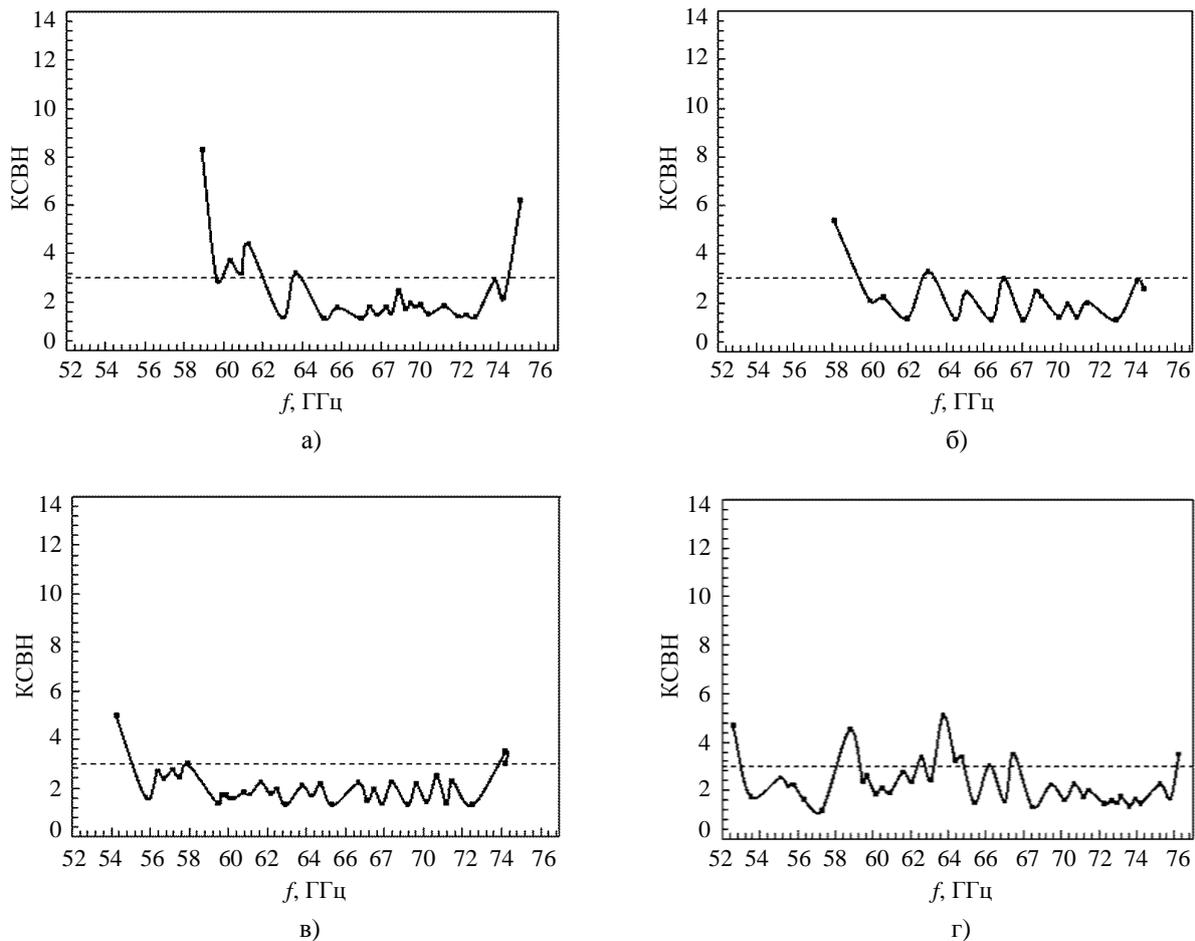


Рис. 5. Зависимость КСВН(f) в диапазоне рабочих частот клинотрона при перемещении стенки резонатора на расстояние D , равное: а) $-D = 0,4$ мм; б) $-D = 0,65$ мм; в) $-D = 1,15$ мм; г) $-D = 2,4$ мм (пунктирная линия отмечает уровень КСВН = 3)

Выводы. Таким образом, на примере клинотрона диапазона 55–75 ГГц экспериментально показано, что в клинотронах мм диапазона можно добиться существенного уменьшения КСВН в выходном волноводе в полосе частот до 30 % оптимизации геометрии полости резонатора поверхностной волны. На основании практики разработки клинотронов этот результат позволяет сделать вывод о том, что возможно расширение непрерывной полосы электрической перестройки частоты клинотронов мм диапазона до 20–25 % за счет изменения конструкции прибора, предполагающего увеличение расстояния до противоположной стенки резонатора.

Проведенные исследования показали также, что использование настроечного поршня с целью расширения полосы непрерывной перестройки частоты клинотрона не дали положительных результатов.

1. Левин Г. Я., Бородкин А. И., Кириченко П. Я. и др. Клинотрон / Под ред. А. Я. Усикова. – Киев: Наук. думка, 1992. – 200 с.

2. Альтишулер Ю. Г., Татаренко А. С. Лампы малой мощности с обратной волной. – М.: Сов. радио, 1963. – 296 с.
 3. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чумак В. Г., Чурилова С. А. Добротность резонансной линии клинотронов миллиметрового диапазона // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – 6, №4. – С. 317–322.
 4. Париков В. А. Расчет параметров резонансной ЛОВ // Электрон. техника. Сер. 1. Электрон. СВЧ. – 1966. – № 8. – С. 20–38.
 5. Schunemann K., Vavriv D. Theory of the Clinotron: A Grating Backward-Wave Oscillator with Inclined Electron Beam. // IEEE Trans. Electron Devices. – 1999. – 46, no. 11. – P. 2245–2252.
 6. Пишко О. Ф., Чурилова С. А. Моделирование пространства взаимодействия в клинотронах миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. // Успехи совр. радиоэлектрон. Зарубеж. радиоэлектрон. – 2004. – № 1. – С. 10–19.
 7. Кириченко А. Я. Пути улучшения выходных параметров ЛОВО, использующих электронные потоки конечной толщины // X Всесоюз. конф. «Электроника СВЧ»: Тез. докл. – Минск: Радиотехнический ин-т АН БССР, 1983. – Т. 1. – С. 101–102.
 8. Ефимов Б. П., Кириченко А. Я., Бужинский А. П. Экспериментальное исследование влияния отражений на частотные характеристики ЛОВ миллиметрового диапазона // Тр. Ин-та радиофизики и электрон. АН УССР. – 1967. – 15. – С. 141–157.
 9. www.istok-mw.ru/products/unf/products_5_1.htm

EXPANDING OPPORTUNITIES
FOR CONTINUOUS BAND OF ELECTRICAL
FREQUENCY CHANGE IN CLINOTRON:
EXPERIMENTAL INVESTIGATION

V. G. Chumak, S. V. Pankov

In this paper possibilities of the extension of the continuous frequency tuning bandwidth in the clinotron operating frequency range are studied. The most attractive approach is optimization of the geometry of the slow-wave oscillatory system of the tube. It is shown that by means of the distance variation between the slow-wave structure and the opposite cavity wall it is possible to provide the continuous frequency tuning bandwidth up to 20–25 %.

Key words: clinotron, millimeter range, vacuum devices, frequency tuning bandwidth.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
МОЖЛИВОСТІ РОЗШИРЕННЯ НЕПЕРЕРВНОЇ
СМУГИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПЕРЕБУДОВИ
ЧАСТОТИ В КЛІНОТРОНІ МІЛІМЕТРОВОГО
ДІАПАЗОНУ

В. Г. Чумак, С. В. Паньков

Наведено результати досліджень для потенційного розширення смуги безперервного перестроювання частоти у робочому діапазоні кліноотрона. Кращим засобом є вибір порожнини резонатора поверхневої хвилі прилади. Змінюючи відстань між системою, що сповільнює, і протилежною стінкою у резонаторі, можливо забезпечити безперервне перестроювання до 20–25 %.

Ключові слова: кліноотрон, міліметровий діапазон, вакуумні прилади, смуга перестроювання частоти.

Рукопись поступила 18 ноября 2008 г.