

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫХОДНОГО УСТРОЙСТВА КЛИНОТРОНА

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

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
4, ул. Краснознаменная Харьков, 61002, Украина
E-mail:rai@ira.kharkov.ua*

Численным методом исследованы электродинамические характеристики устройства вывода энергии из клинотрона. Представлены результаты расчета параметров матрицы рассеяния для модели внутренней (вакуумной) части клинотрона, проведено сравнение с экспериментальными данными. Ил. 7. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: клинотрон, матрица рассеивания, S -параметры, устройство вывода энергии.

Клинотрон получил известность и широкое применение как источник электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, имеющий повышенный уровень выходной мощности в сочетании с широкой полосой электрической перестройки частоты [1]. Эти характеристики прибора остаются уникальными, а приборы востребованными до настоящего времени. Современное состояние разработок клинотронов непрерывного действия подробно представлено в обзорах [2, 3], а в возможности их приобретения заинтересованы, в частности, такие организации, как Институт атомной энергии, Россия; Elva-1 Millimeter Wave Division, St. Petersburg, Russia; Technische Universitat Hamburg-Harburg, Germany; Dartmouth College, Hanover, USA. Поэтому актуальными являются и вопросы совершенствования клинотронов: повышение выходной мощности; увеличение полосы перестройки частоты; укорочение длины волны; улучшение эксплуатационных характеристик и т. д.

К основным факторам, приводящим к ухудшению выходных характеристик клинотронов, относится несовершенство выходного устройства прибора.

Конструктивно узел вывода энергии из пространства взаимодействия клинотрона представляет собой сложный волноводный тройник: пространство взаимодействия; выходной волновод; анодное отверстие для вбрасывания электронного пучка. При этом в клинотронах используются широкие, по сравнению с длиной волны замедляющей системы (ЗС), электронные пучки и выходные волноводы, что приводит к возбуждению в узле вывода энергии высших типов колебаний, ответвлению части мощности в анодное отверстие, отражению части мощности в пространство взаимодействия. Экспериментально было показано, что в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметрового диапазонах длин волн коэффициент передачи мощности из пространства взаимодействия в выходной вол-

новод может составлять $\gamma = 0,1 \div 0,6$ [1]. Выбрать экспериментально оптимальную конфигурацию и размеры этого узла практически невозможно.

В то же время современные системы электродинамического моделирования и проектирования позволяют моделировать и оптимизировать трехмерные СВЧ устройства с очень высокой степенью точности. В частности, мощный пакет программ High Frequency Structure Simulation (HFSS) [4], который вычисляет многомодовые S -параметры матрицы рассеяния и электромагнитные поля в трехмерных пассивных СВЧ структурах произвольной формы, позволяет провести оптимизацию одного или нескольких параметров в соответствии с выбранными критериями.

HFSS использует для решения уравнений электродинамики метод конечных элементов (МКЭ), включающий адаптивное генерирование и деление ячеек. Решения для электромагнитного поля, найденные из уравнений Максвелла, позволяют определить электродинамические характеристики СВЧ устройств с учетом возникновения и преобразования одних типов волн в другие, потерь в материалах на излучение и т. д.

Нами приведены результаты исследований по расчету и оптимизации узла вывода энергии в клинотроне.

1. Описание базовой электродинамической модели. Как указывалось выше, в узле вывода энергии существуют волны высших типов, при этом рассчитанная картина поля носит сложный характер. Если же входные линии одномодовые, то интерес представляют только амплитуды основных волн, т. е. одномодовая матрица рассеяния. Поэтому для апробирования метода мы выбрали модель с одномодовыми входными линиями, которая соответствует пространству взаимодействия и узлу вывода энергии клинотрона 5-мм диапазона. Результатами расчета на программе HFSS трехмерной модели волноводного тройника, общий вид которого представлен на рис. 1, являются его S -параметры (S_{11} , S_{21} , S_{22} , S_{31} , S_{33}), связы-

вающие амплитуды падающих и отраженных волн основного типа.

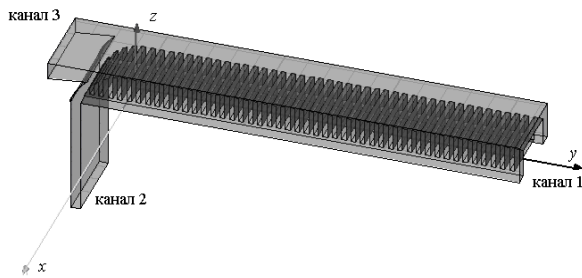


Рис. 1. Трехмерная модель волноводного тройника: общий вид

Пространством взаимодействия (канал 1) является П-волновод длиной 17 мм, поперечным сечением $3,6 \times 1,6 \text{ мм}^2$, на выступе которого $2,5 \times 1,2 \text{ мм}^2$ нарезана гребенчатая ЗС (шаг ЗС - 0,4 мм, высота ламели - 1,06 мм). С выходным волноводом (канал 2) прямоугольного сечения $3,6 \times 0,4 \text{ мм}^2$, длиной 5 мм канал 1 соединен плавным переходом с радиусами $R_1 = 2 \text{ мм}$ и $R_2 = 2,4 \text{ мм}$. Канал для вбрасывания электронного пучка (канал 3) имеет вид конусного волновода поперечного сечения $0,4 \times 3,6 \rightarrow 0,7 \times 3,6 \text{ мм}^2$, длиной 3,2 мм.

Тестирование пакета HFSS проведено сравнением результатов расчета дисперсионной характеристики ЗС в волноводе и частот отсечки П-волновода точными электродинамическими методами [5,6] с использованием программы HFSS. Относительная точность вычислений не хуже 10^{-5} .

2. Расчет и анализ результатов. Расчет параметров матрицы рассеяния модели волноводного тройника выполнялся МКЭ с использованием HFSS, сетка конечных элементов в вычислениях имела число ячеек $N = 72830$, центральная частота решения $f_0 = 60 \text{ ГГц}$, полоса частот анализа 58 - 62 ГГц. Полученные результаты сравнивались с данными экспериментальных исследований.

На первом этапе компьютерного моделирования был проведен анализ модели без ЗС, рассчитанные на программе HFSS частотные характеристики коэффициентов прохождения (S_{21} , S_{31}) и отражения (S_{11}) которой приведены на рис. 2. На рис. 3 приведены зависимости коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) от частоты в каналах. В программе HFSS КСВН определяется

по формуле
$$\text{КСВН} = \frac{1 + |S_{jj}|}{1 - |S_{jj}|}$$
, где $|S_{jj}|$ модуль

коэффициента отражения в соответствующем канале.

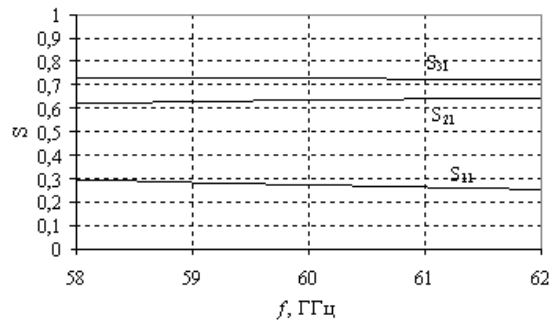


Рис. 2. Частотные характеристики параметров S_{11} , S_{21} , S_{31} , показывающие деление мощности между каналами волноводного тройника без ЗС

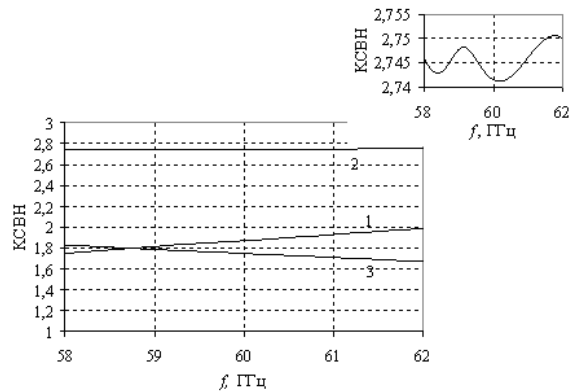


Рис. 3. Зависимость КСВН(f) в каналах тройника без ЗС. На вставке в увеличенном масштабе показан характер изменения КСВН(f) в канале 2, цифры указывают номер канала

Если исследуемый тройник не имеет ЗС, то картина распределения мощности имеет следующий вид (рис. 2): коэффициент прохождения в канал 3 (S_{31}) несколько выше, чем в канал 2 (S_{21}). Соответственно КСВН (рис. 3) в канале 2 больше (кривая 2), чем в канале 3 (кривая 3). Коэффициенты отражения и прохождения в данном частотном диапазоне не имеют резонансов. Характерно также, что в анализируемой полосе частот КСВН в каналах меняется незначительно. На вставке рис. 3 приведена зависимость КСВН(f) в выходном волноводе (канал 2) в увеличенном масштабе, т. е. несмотря на то, что в узле тройника имеются неоднородности в виде острых углов и изгибов, это не приводит к появлению резонансов в частотных характеристиках коэффициентов отражения и прохождения.

Если в канале 1 размещена ЗС, то параметры матрицы рассеяния существенно меняются. На рис. 4 приведены частотные характеристики коэффициентов прохождения и отражения. В модели с ЗС в канале 1 распространяется медленная волна. Вывод медленной волны из ЗС происходит путем плавного изменения глубины резонаторов непосредственно в узле тройника, здесь медленная волна преобразуется в волноводную.

Такая трансформация волн приводит к появлению резонансов во всех каналах. На рис. 5 представлена зависимость КСВН от частоты. В канале с ЗС рассчитанный $КСВН \leq 4$ (кривая 1), в остальных каналах значения КСВН значительно выше и характер частотных зависимостей существенно резонансный (кривые 2, 3). Между каналами 2 (S_{21}) и 3 (S_{31}) мощность делится примерно поровну и характер этих зависимостей от частоты идентичный.

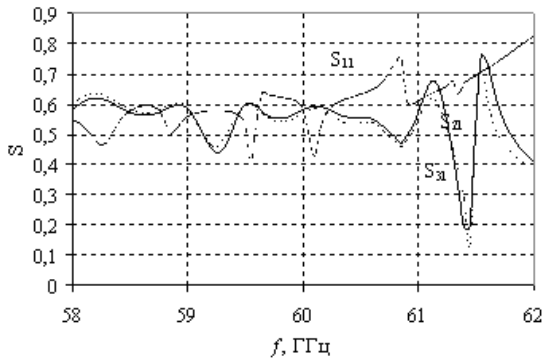


Рис. 4. Частотные характеристики параметров S_{11} , S_{21} , S_{31} , показывающие деление мощности между каналами волнового тройника с ЗС

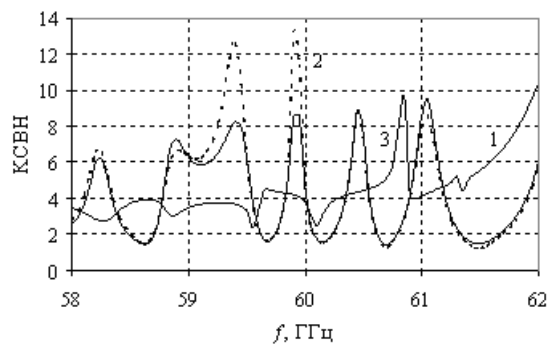


Рис. 5. Зависимость КСВН (f) в каналах тройника с ЗС, цифры на рисунке указывают номер канала

Сравнение расчетных и экспериментальных данных наиболее удобно и естественно проводить сопоставлением КСВН в выходном волноводе, величину которого можно измерять в уже собранном приборе и получать при расчете.

На рис. 6 приведены экспериментально снятые зависимости КСВН (f) в выходном волноводе клинотрона и пунктиром нанесена расчетная зависимость. Можно отметить, что имеется качественное соответствие результатов расчета и эксперимента. Частоты минимумов и максимумов КСВН практически совпадают, а различие в 0,2 - 0,5% в определении резонансных частот можно объяснить погрешностью измерения частоты в

эксперименте. Различие в абсолютных значениях КСВН следовало ожидать, так как оно наблюдается и в эксперименте для различных экземпляров приборов из-за неточностей их изготовления и сборки.

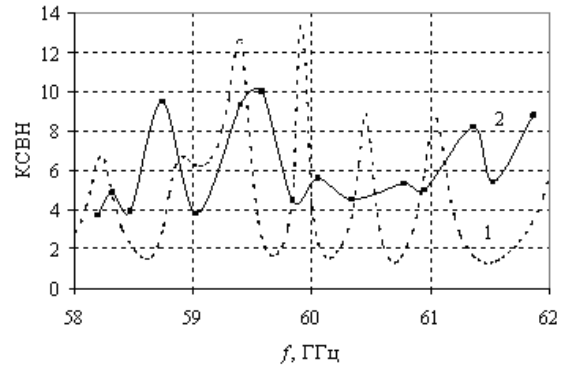


Рис. 6. Зависимость КСВН(f) в выходном волноводе (канал 2): 1 – расчет; 2- эксперимент

Клинотроны - резонансные приборы, так как ЗС не имеют нагрузки на коллекторном конце, это позволяет получить повышенный уровень выходной мощности, КПД и стабильности частоты. Однако 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.). Экспериментально было показано, что для получения непрерывной полосы генерации необходимо обеспечить в выходном волноводе $КСВН \sim 3$ [7]. Исходя из этого, следует проводить оптимизацию узла вывода энергии. Поэтому уменьшение коэффициента отражения в канале 2 (S_{22}) может служить одним из основных критериев оптимизации узла вывода энергии при изменении размеров и конфигурации его каналов. Оптимизируемыми параметрами могут являться, в частности, размеры П-волновода, размеры анодного отверстия, величина радиуса согласования ЗС. При расчете сложных структур, имеющих мелкоструктурные детали, необходимо особое внимание обращать на то, каким образом происходит разбиение пространства на сетку и как устанавливается процесс адаптации. Узел вывода энергии клинотрона является такой структурой, так как состоит из волноводов различного сечения и содержит в одном плече тройника ЗС. Это надо учитывать при проведении дальнейших исследований.

Использование компьютерного моделирования интересно еще и тем, что можно визуально наблюдать перераспределение мощности в узле вывода энергии при изменении геометрии устройства и частоты. Для примера на рис. 7 представлена картина электрического поля на

частоте $f = 60$ ГГц для двух рассмотренных моделей волноводного тройника. Изображение позволяет количественно определить напряженность электрического поля по интенсивности цвета и увидеть характерные изменения в его распределении. Кроме того, HFSS позволяет анали-

зировать электромагнитное поле во всевозможных сечениях. При анимации изменение фазы возбуждающего поля создает впечатление его прохождения через структуру, что также можно использовать при оптимизации.

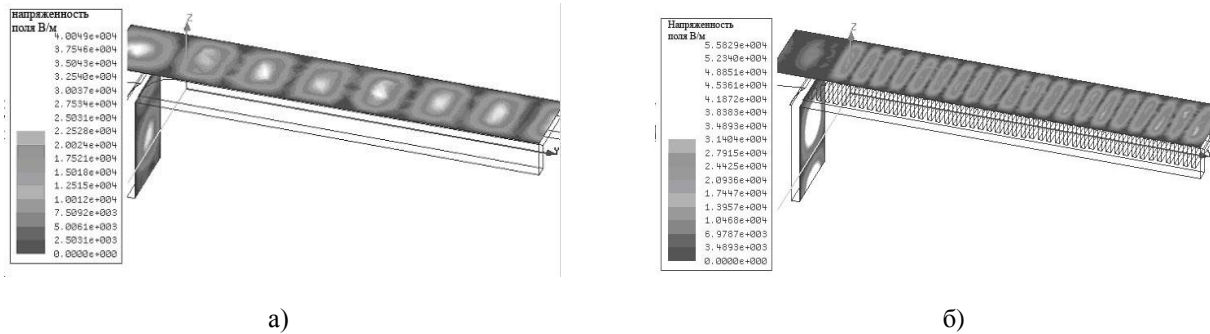


Рис. 7. Визуализация картины распределения электрического поля в волноводном тройнике: а) - без ЗС; б) - с ЗС

Полученные численные результаты позволяют сделать вывод о необходимости дальнейших поисков более приемлемых параметров согласования рассмотренного волноводного тройника.

Выводы. С применением пакета программ электродинамического моделирования и проектирования трехмерных СВЧ структур HFSS получены электродинамические характеристики устройства вывода энергии клинотрона, представляющего собой сложный волноводный тройник. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов позволяет сделать вывод, что указанным методом можно провести оптимизацию данного узла прибора с целью улучшения выходных характеристик клинотрона.

1. Левин Г. Я., Бородкин А. И., Кириченко А. Я., Чурилова С. А. Клинотрон. / Под ред. А. Я. Усикова. - Киев: Наукова думка, 1992. - 197 с.
2. Кириченко А. Я., Чурилова С. А. Клинотрон // Радиофизика и электроника. - 2004. - 9, спец. вып. - С.68-74.
3. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чумак В. Г., Чурилова С. А. Состояние разработок клинотронов непрерывного действия // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. - 2004. - № 8. - С.3-12.
4. HFSS - High Frequency Structure Simulation. - 2000.
5. Эллиот Р. Теория плоских ребристых поверхностей // Вопросы радиолокационной техники. - 1955. - № 5. - С.5-10.
6. Kirilenko A., Rud L., Tkachenko V. Cad of evanescent-mode bandpass filters based on the shot ridged waveguide sections // John Wiley & Sons, Inc. Int J RF and Microwave CAE. - 2001. - № 11. - P.354-365.

7. 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.

ELECTRODYNAMICS OF A POWER OUTPUT UNIT IN THE CLINOTRON

O. F. Pishko, V. G Chumak, S. A. Churilova

Numerical simulation has been applied to analyze electrodynamic characteristics of a power output unit in a clinotron generator. Parameters of the scattering matrix have been calculated for a model internal (vacuum) part of the clinotron, with the results compared with experimental data.

Key words: clinotron, scattering matrix, S-parameters, power output.

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРУ ВИВОДУ ЕНЕРГІЇ З КЛІНОТРОНУ

О. Ф. Пішко, В. Г. Чумак, С. А. Чурилова

Чисельним методом досліджено електродинамічні характеристики пристрою виводу енергії з клінотрону. Наведено результати розрахунків параметрів матриці розсіювання для моделі внутрішньої (вакуумної) частини клінотрону, проведено порівняння з експериментальними даними.

Ключові слова: клінотрон, матриця розсіювання, S-параметри, пристрій виводу енергії.

Рукопись поступила 12 декабря 2006 г.