

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АМПЛИТРОНА

Замедляющая система (ЗС) является одним из основных конструктивных элементов амплитрона. Выбор ЗС для усилителя М-типа зависит главным образом от требуемого диапазона частот, коэффициента формы и пригодности системы для охлаждения. ЗС должна удовлетворять и ряд других требований. В частности, она должна быть достаточно широкополосной, обладать высоким волновым сопротивлением, быть свободной от совпадающих по скорости паразитных высокоимпедансных видов колебаний и сохранять стабильность размеров в рабочем режиме [1].

Среди ЗС трем основным требованиям удовлетворяет лестничная система со связками. Другие типы ЗС, например встречно-штыревая, гребенка, подходят по своим электрическим параметрам, но их трудно охлаждать.

Следует отметить, что строгое теоретическое исследование ЗС связано с решением уравнений Максвелла при очень сложных граничных условиях, что практически приводит к трудным математическим вычислениям. Поэтому расчет ЗС в каждом отдельном случае проводится различными приближенными методами. Целью расчета является определение дисперсионных характеристик системы и сопротивления связи (R_{CB}). При исследовании ЗС в большинстве случаев, если это не оговаривается специально, потерями в металлических стенках пренебрегают.

В данной статье приведены результаты расчета ЗС трех типов: плоской гребенки, встречных штырей и лестничного типа в анодном блоке со впадинами. Разработанная программа расчета электродинамических параметров ЗС реализована на языках Фортран 90 и Паскаль 7.0.

При решении дисперсионных уравнений ЗС используются графический и различные итерационные методы. Из итерационных наиболее часто используются методы Ньютона-Раффсона и простых итераций [2]. В данной работе для расчета гребенчатой ЗС использовался метод простых итераций, для расчета встречно-штыревой и лестничной замедляющих систем — метод многопроводных линий.

На рис. 1-3 приведены расчетные (сплошная линия) и экспериментальные дисперсионные характеристики и кривые сопротивления связи исследуемых ЗС. Анализируя результаты, полученные в ходе численного эксперимента, можно выделить положительные и отрицательные стороны ЗС, применяющихся в данном типе приборов.

Наиболее простую конфигурацию из всех типов ЗС имеет одиночная плоская гребенка. Характеристики гребенчатой структуры изображены на рис. 1.

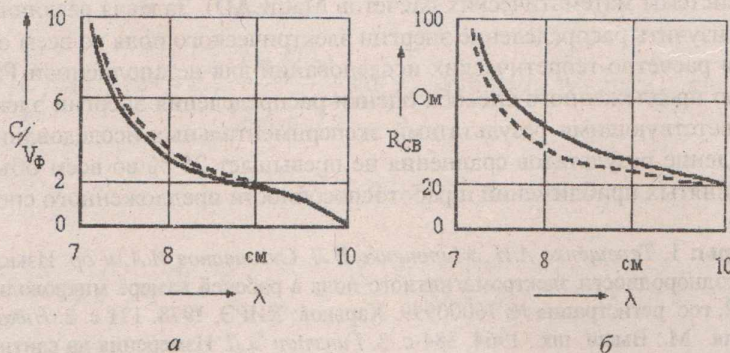


Рис. 1

Расхождения в расчетных и экспериментальных характеристиках дисперсии и сопротивления связи не превышают 4 % и 9 % соответственно, вызваны тем, что при малом расстоянии пластин от

катода ($a = 0.1 \text{ см}$), многое зависит от точности изготовления ЗС, а в данном случае допуск на размер составил $\Delta a = 0.025 \text{ см}$.

Из этого же рисунка видно, что система обладает нормальной положительной дисперсией, поскольку фазовая скорость уменьшается с уменьшением длины волны и направлена в ту же сторону, в которую направлено движение энергии. Значительное уменьшение фазовой скорости наступает при приближении к длине волны, на которой имеется четвертьволновой резонанс щелей, образующих гребенку. Из рисунка следует, что основная волна (нулевая пространственная гармоника) обеспечивает значительное замедление лишь в узком диапазоне длин волн. Гребенке присуща значительно более слабо выраженная дисперсия, чем у других (из рассматриваемых) типов ЗС. Расчеты и эксперимент показывают, что сопротивление связи системы гребенчатого типа сильно изменяется в зависимости от длины волны и увеличивается с ростом замедления. Таким образом, можно сделать вывод, что гребенчатая ЗС может использоваться в амплитроне на минус первой обратной гармонике, обеспечивающей взаимно противоположное направление фазовой и групповой скорости. Применение высоких номеров пространственных гармоник неэффективно, т.к. при этом ухудшается взаимодействие электронов с полем ВЧ волны данной гармоники (уменьшается величина $R_{\text{СВ}}$).

Рассмотренная система обладает повышенной теплорассеивающей способностью и жесткостью, а также удобна в технологическом отношении при использовании в нижней части сантиметрового и миллиметрового диапазонах длин волн.

На рис. 2 приведены дисперсионные характеристики и кривые сопротивления связи встречно-штыревой ЗС. Расхождения в расчетных и экспериментальных характеристиках дисперсии и сопротивления связи не превышают 7 % и 9 % соответственно. Они вызваны тем, что используемая для расчета замедления формула не учитывает зависимость фазовой скорости от расстояния до проводящей плоскости. В случае графиков сопротивления связи это отличие вызвано приближенным вычислением групповой скорости волны.

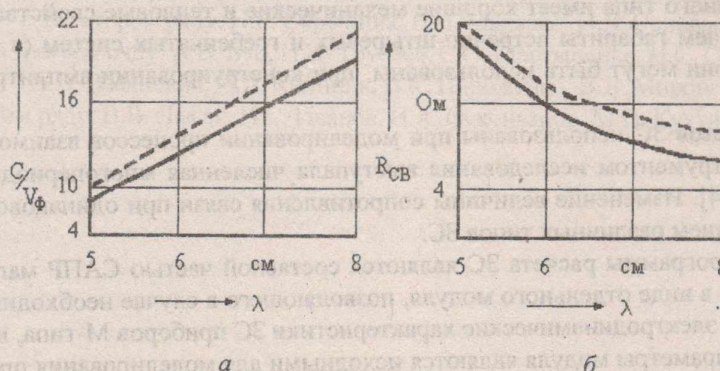


Рис. 2

Как видно из графиков, дисперсия основной (обратной) волны в данной системе имеет аномальный характер, т.к. абсолютная величина фазовой скорости уменьшается с увеличением длины волны в свободном пространстве. Анализ показывает, что сопротивление связи системы встречных штырей на основной волне (минус первая гармоника) падает при увеличении длины волны. Величина замедления у этой системы значительно выше, а величина сопротивления связи значительно ниже, чем у гребенки в одном диапазоне длин волн.

Системы этого типа в области сантиметрового диапазона имеют наиболее приемлемые габариты и позволяют сравнительно легко осуществить интенсивный отвод тепла, а также выполнить весьма жесткую и прочную конструкцию прибора.

На рис. 3 приведены дисперсионные характеристики и кривые сопротивления связи лестнично-ЗС в анодном блоке со впадинами. Расхождения в расчетных и экспериментальных характеристиках дисперсии и сопротивления связи не превышают 8 % и 15 % соответственно. Они обусловлены тем, что в однородной области одновременно существуют волны LEM и LEO, а метод многопроводных линий (каким рассчитывалась данная система) не учитывает поле LEO. При вычислении сопротивления связи к тому же приближенно вычислялась групповая скорость.

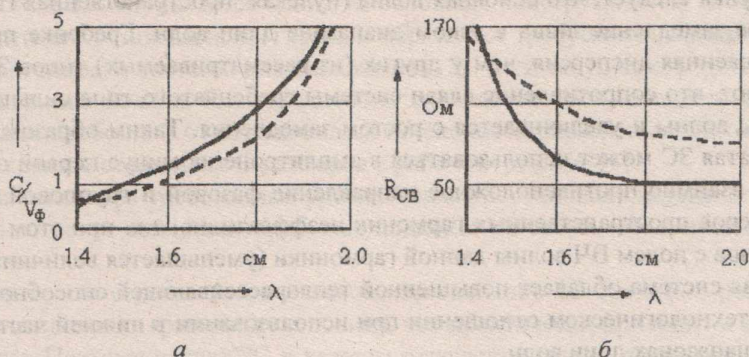


Рис. 3

Из анализа графиков следует, что основная гармоника волны для лестничной системы является обратной с аномальной дисперсией. Однако замедление для выбранных размеров у данной системы невелико. Увеличить замедление можно увеличением длины штырей, при этом увеличится и длина волны, что не всегда желательно. Из рис. 3 хорошо видно, что хотя данная система и обладает приемлемой величиной замедления, но в то же время имеет сильно выраженную дисперсию и довольно узкополосна. Однако сопротивление связи у нее значительно выше, чем у других видов ЗС.

Система лестничного типа имеет хорошие механические и тепловые свойства. Габариты подобных систем больше, чем габариты встречно-штыревых и гребенчатых систем (в тех же диапазонах длин волн) поэтому они могут быть использованы при конструировании амплитронов миллиметрового диапазона.

Результаты расчетов ЗС использованы при моделировании процессов взаимодействия в амплитроне. При этом инструментом исследования выступала численная многопериодная модель магнетронного усилителя [4]. Изменение величины сопротивления связи при одинаковой рабочей частоте достигается применением различных типов ЗС.

Разработанные программы расчета ЗС являются составной частью САПР магнетронных усилителей и используются в виде отдельного модуля, позволяющего в случае необходимости по заданной частоте рассчитывать электродинамические характеристики ЗС приборов М-типа, в частности. Таким образом, выходные параметры модуля являются исходными для моделирования процесса взаимодействия в этом типе приборов.

Программа расчета ЗС представляет практический интерес для разработчиков приборов СВЧ и используется при разработке усилителей М-типа, а также в учебном процессе в ХТУРЭ на кафедре ФОЭТ при выполнении дипломного и курсового проектирования, лабораторных работ по различным дисциплинам.

Список литературы: 1. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Сов. Радио, 1966. 631 с. 2. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на Фортране. М.: Мир, 1977. 584 с. 3. Альтигуллер Ю.Г., Татаренко А.С. Лампы малой мощности с обратной волной. М.: Сов. Радио, 1963. 295 с. 4. Васянович А.В. Численная модель многочастотного взаимодействия в усилителях с распределенной эмиссией // Радиотехника. Харьков: ВШШ, 1987. Вып. 80. С. 90-96.

Харьковский государственный технический
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 05.05.99