

Моделирование дроссельного элемента катодной ножки мощного магнетрона непрерывного действия

А.О. Морозов¹, И.В. Лушников¹, А.В. Прокопенко²

¹АО «НПП «Магратеп»

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Аннотация: в работе представлено техническое решение, направленное на снижение уровня внетрактового излучения (ВТИ) мощного магнетрона непрерывного действия (на примере модели М-177). Проведен спектральный анализ ВТИ от магнетрона и определены проблемные частоты. Выполнено моделирование конструкции катодной ножки с традиционным дросселем и с применением двойного коаксиального дросселя для эффективного ослабления излучения на основной частоте и второй гармонике рабочей частоты. Предложенное техническое решение повысит электромагнитную совместимость магнетрона с окружающей аппаратурой и улучшит безопасность эксплуатации мощных СВЧ-устройств.

Ключевые слова: магнетрон, спектральные характеристики, генерация гармоник, внетрактовое излучение, четвертьволновой дроссель, моделирование

1. Введение

Широкое применение магнетронов в бытовых и промышленных установках СВЧ-нагрева (СВЧ-печи, системы дефростации, сушки, стерилизации и др.) делает особенно актуальной задачу обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС) с другим радиоэлектронным оборудованием. Современные промышленные магнетроны, такие как модель М-177 (мощность 75 кВт, рабочая частота 915 МГц), демонстрируют высокую эффективность генерации СВЧ-энергии при сравнительно низкой себестоимости. Однако их эксплуатация связана с проблемой возникновения внетрактового излучения – паразитных электромагнитных волн, просачивающихся во внешнюю среду через катодную ножку магнетрона из анодного блока. ВТИ снижает надежность и долговечность магнетрона, источника питания, и аппаратуры в целом и приводит к проблемам при эксплуатации установок.

В магнетроне М-177 с катодной ножкой традиционной конструкции используемые методы подавления ВТИ не обеспечивают достаточного ослабления излучения. Известно, что широко применяемые четвертьволновые дроссели эффективно подавляют излучение только на рабочей частоте (для М-177 – 915 МГц), но не влияют на излучение на второй гармонике рабочей частоты (1,833 ГГц), которая в спектре магнетрона доминирует наряду с основной частотой. ВТИ ограничивает возможности применения мощных магнетронов в условиях плотной электромагнитной обстановки и требует разработки новых конструктивных решений. Задача модернизации дроссельного элемента на катодной ножке мощного магнетрона решается в этой работе.

2. Исследование спектральных характеристик внетрактового излучения

Выполнено изучение спектральных характеристик излучения в диапазоне 10 МГц - 3 ГГц с катодной ножки магнетрона М-177 работающего на мощности 75 кВт. Для измерения использовался анализатор спектра N9938A компании Keysight Technologies, набор калиброванных аттенуаторов и широкополосная диэлектрическая антенна. Антенна располагалась на расстоянии 1 м от магнетронного блока.

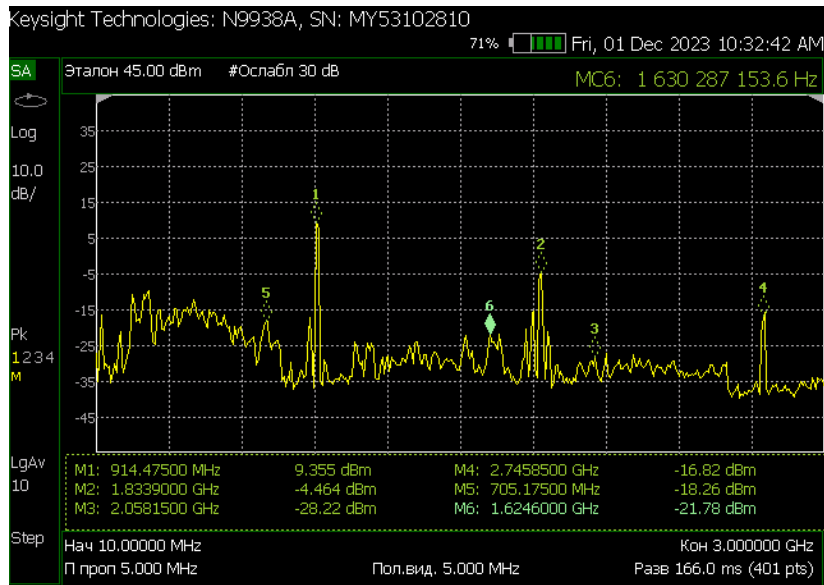


Рис.1. Спектрограмма внеграптового излучения магнетрона М-177, работающего на мощности 75 кВт.

Из спектрограммы видно наличие частот основного вида колебаний 914,47 МГц и частот близких к 2-ой и 3-ей гармонике этой частоты. График показывает, что в спектре доминируют частоты основного вида колебаний (914,47 МГц) и второй гармонике (1,833 ГГц). Неполное соответствие целым числам объясняется влиянием эффекта электронного смещения частоты.

3. Моделирование катодной ножки магнетрона М-177

Для подавления нежелательных СВЧ-колебаний интерес представляют технические решения, представляющие из себя различные дроссельные структуры по причине простоты их реализации и надежности блокирования СВЧ [1]. Основным требованием, предъявляемым к дросселю, является получение чисто стоячей волны при КСВ, стремящимся к бесконечности [2]. Однако использование подобных технических решений помогает ослабить уровень побочных колебаний только на рабочей частоте магнетрона. Проблема заключается в том, что спектр частот на выходе магнетрона кроме основного колебания на рабочей частоте содержит побочные колебания на частотах, находящихся за пределами рабочей полосы частот. Несмотря на то что уровень мощности побочных колебаний заметно уступает уровню основной частоты, они генерируются на высших частотах и лучше выходят из анодного блока через катодную ножку магнетрона и устройство вывода энергии.

Обзор доступных литературных источников показал отсутствие данных о способах расчета или экспериментальных характеристик дроссельных элементов, работающих в двухчастотном режиме. Для проведения исследований в программе CST Microwave Studio 2020 выполнено моделирование существующей катодной ножки магнетрона М-177 и определены ее основные параметры. Катодная ножка рассматривается как штыревая антенна, представляющая собой открытый конец коаксиальной линии, изображенной на рисунке 2:

- металлический цилиндр катодного держателя сквозь керамический изолятор излучает в пространство с открытыми границами;
- штыревая антенна возбуждается коаксиальной линией, проходящей через полюсный наконечник;
- в ближней зоне на оси ножки размещается зонд, величина сигнала

которого рассчитывается в программе CST Microwave Studio.

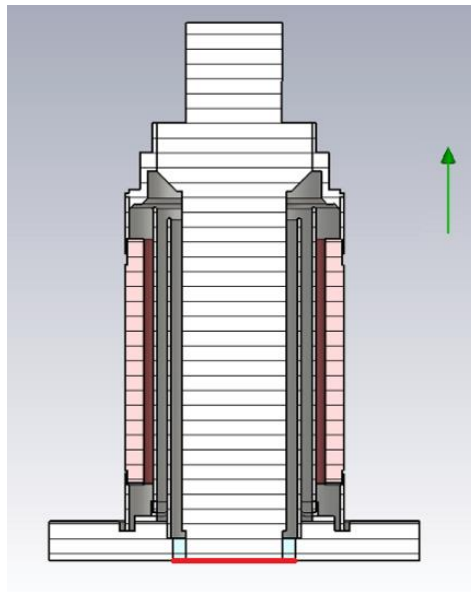


Рис. 2. Модель катодной ножки магнетрона М-177.

На рисунке 3 показано переходное ослабление сигнала для диапазона частот 800-2000 МГц, рассчитанные в CST Studio 2020 для существующей дроссельной структуры магнетрона М-177.

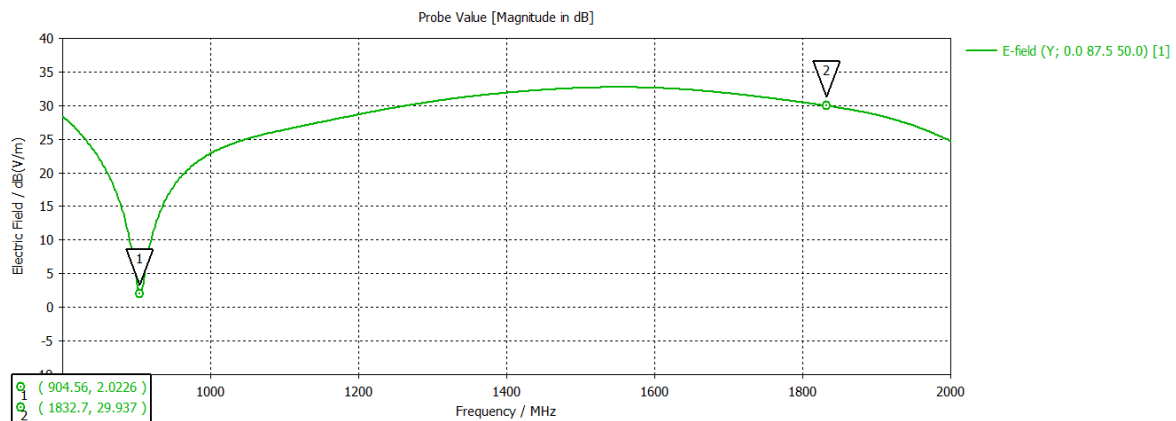


Рис. 3. Переходное ослабление существующей дроссельной структуры магнетрона М-177.

Рассчитанное ослабление существующего дросселя составляет не менее 15 дБ в полосе частот ± 15 МГц от рабочей частоты. Для реализации более высокого подавления 25-30 дБ на практике необходимо добиваться совпадения частот дросселя и резонаторной системы. Для этого нужно точно выдерживать длину дросселей, их осевое положение и проводить точные «холодные» измерения с помощью современного анализатора цепей [3]. Также из рисунка 3 следует, что на частоте второй гармоники ослабления электромагнитного излучения не наблюдается. «Холодные» измерения показали совпадение частоты подавления дросселя с рабочей частотой магнетрона. Наблюдаемое отклонение экспериментальных данных от расчётных вызвано упрощённым представлением компоновки катодного узла при компьютерном моделировании.

4. Моделирование модернизированной катодной ножки магнетрона М-177

В связи с тем, что в спектре магнетрона доминируют частоты основного вида колебаний (914,47 МГц) и второй гармоники (1,833 ГГц), было решено модернизировать существующую дроссельную систему для дополнительной фильтрации внетрактового излучения на частоте второй гармоники. Двойной коаксиальный дроссель крепится непосредственно на катодный держатель, к которому подводится высокое напряжение. Внешняя оболочка коаксиального дросселя короче и служит для фильтрации второй гармоники частоты основного вида колебаний (см. рисунок 4). Предполагается, что модернизированная катодная ножка с дополнительной фильтрацией второй гармоники также будет обладать уменьшенной вероятностью пробоя за счет минимизации осевой ёмкости дросселя (катод – анод).

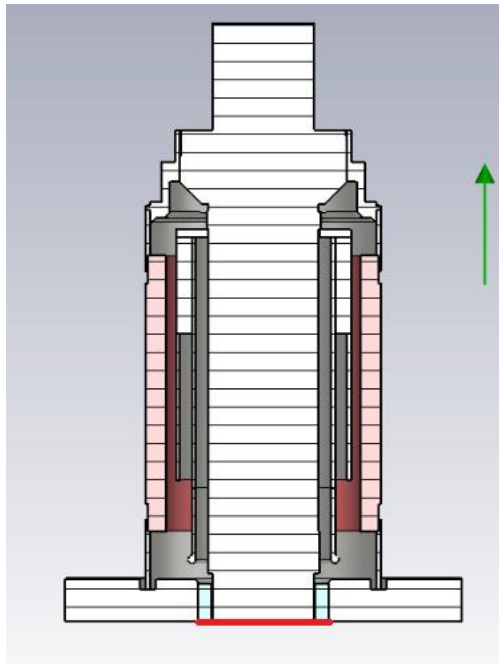


Рис. 4. Модернизированная дроссельная система магнетрона М-177.

Выполнено численное моделирование и оптимизация по частотам дроссельной структуры для подавления излучения из катодной ножки магнетрона на первой и второй гармониках. Переходное ослабление модернизированной дроссельной структуры магнетрона М-177 в диапазоне частот 800-2000 МГц представлено на рисунке 5. Результаты показывают, что подавление на рабочей частоте остается без существенных изменений при этом показатель ослабления на рабочей частоте существенно не изменился. После оптимизации длин внешней и внутренней оболочек коаксиального дросселя удалось получить значительный рост переходного ослабления на частоте второй гармоники.

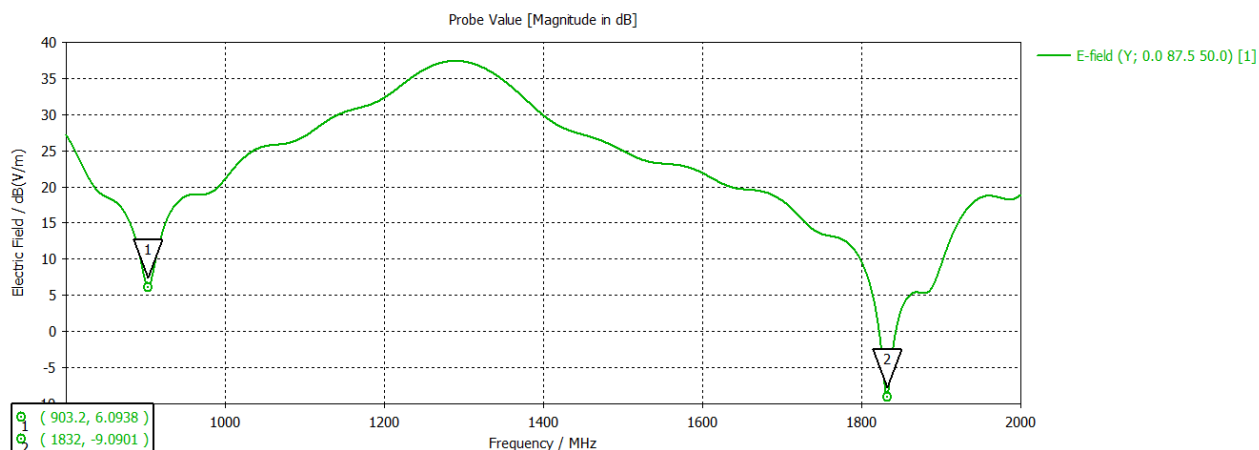


Рис. 5. Переходное ослабление модернизированной дроссельной структуры магнетрона М-177.

5. Заключение

Рассмотрены вопросы электромагнитной борьбы с внутракторным излучением от магнетрона мощного непрерывного режима М-177 и исследованы его спектральные характеристики. Выполнено моделирование стандартной и модернизированной дроссельной структуры катодной ножки. Показано, что у модернизированной конструкции катодной ножки будет улучшена фильтрация побочных излучений на второй гармонике из анодного блока магнетрона.

Список литературы

1. Федотов В.В. Создание малогабаритных магнетронов непрерывного действия мощностью 1-3 кВт и СВЧ камеры для кухонных СВЧ печей на частоте 915 МГц. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. г. Фрязино. 2017.
2. Лебедев И.В., Техника и приборы СВЧ т.1. М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
3. Морозов А.О., Лушников И.В., Савенко Г.П., Прокопенко А.В. Модернизация дроссельного узла в катодной ножке мощного магнетрона непрерывного действия. // Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника». – г. Фрязино, 2025. – с. 65-66.