

Разработка коллектора для мощного сильноточного клистрона с подавлением влияния внешних цепей источника питания

Д.А. Комаров, Ю.Н. Парамонов, Д.А. Калашников, Э.К. Муравьев

АО «НПП «Торий»

Аннотация: в данной работе исследовались способы подавления наведенных токов в коллекторе многолучевого клистрона. Измерялось падение энергии пучка электронов при влете в коллектор во время статического режима работы клистрона. Определено влияние экранирующего кольца, припаянного к экрану выходного блока резонаторов.

Ключевые слова: коллектор, многолучевой клистрон, наведенные токи

1. Введение

При экспериментальном исследовании сильноточных клистронов [1] было отмечено возникновение высоковольтных пробоев между резонаторным блоком и коллектором, несмотря на то, что и блок резонаторов, и сам коллектор находились на потенциале земли. Данное явление объясняется зарядкой паразитной емкости «экран резонаторного блока – коллектор» модулированным электронным потоком. Объектами исследования являлись 30-лучевые клистроны КИУ-271 и КИУ-273, разработанные на предприятии АО «НПП «Торий», с ускоряющим напряжением 45 кВ и общим током 150 А.

2. Постановка задачи

Характерной особенностью статического режима работы клистрона является «дребезг» на фронте импульса, связанный с возбуждением колебательного контура, состоящего из паразитной емкости «экран резонаторного блока – коллектор» и индуктивности внешней цепи источника питания [1]. Время затухания этого «дребезга» полностью определено сопротивлением и индуктивностью цепи. С учетом малого сопротивления заземляющих элементов это время составляет до 0.15 тмп. Амплитуда выбросов полностью определена емкостью коллектора. На рисунке 1 представлена осциллограмма наведенного напряжения на коллекторе КИУ-271 в статическом режиме.

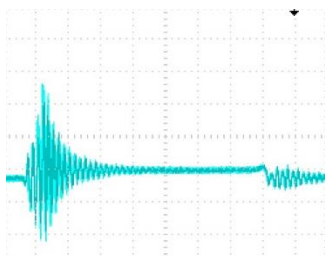


Рисунок 1. Осциллограмма наведенного напряжения на коллекторе клистрона КИУ-271 в статическом режиме

Подобные выбросы приводили к пробоям в цепи коллектора и нестабильности работы прибора в статическом режиме. Для подавления влияния внешней цепи источника питания была разработана программа «Collector Bunch Solver» (патент № 2019613300)

3. Результаты

В результате расчета конструкции клистрона КИУ-271 в программе «Collector Bunch Solver» величина максимального наведенного напряжения между коллектором и экраном резонаторного блока составила 18.8 кВ при емкости коллектора 62 пФ. Была определена зависимость наведенного напряжения при увеличении емкости коллектора (рисунок 2)

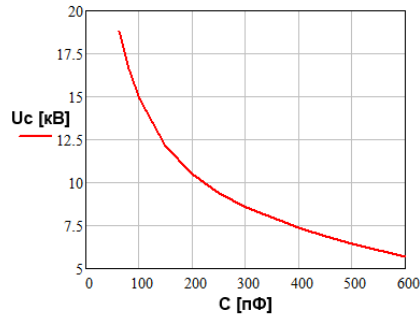


Рисунок 2. Зависимость наведенного напряжения на емкости коллектора от величины емкости

Представленная зависимость была подтверждена экспериментально. При внесении дополнительной емкости до 470 пФ во внешнюю цепь коллектора удалось улучшить токопрохождение вплоть до 90% (рисунок 3) [1]

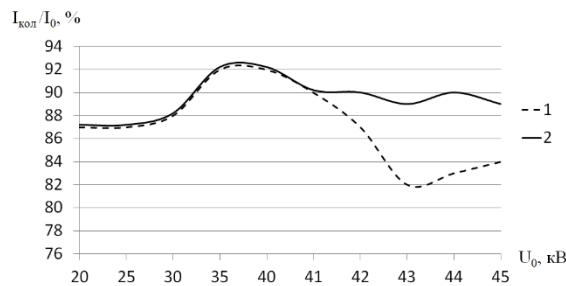


Рисунок 3. Зависимость токопрохождения от приведенной емкости коллектора клистрона КИУ-271 (1 – без емкостей, 2 – с емкостями)

Так как введение дополнительных емкостей не всегда целесообразно, было решено увеличить емкость коллектора конструктивно, уменьшив величину зазора между коллектором и экраном резонаторного блока и продлив данный участок. На рисунке 4 представлено сравнение распределения электрического поля коллектора КИУ-271 и коллектора КИУ-273 в программе «Collector Bunch Solver».



Рисунок 4. Распределение электрического поля в коллекторе КИУ-271 (слева) и КИУ-273 (справа)

Емкость новой конструкции коллектора составила 134 пФ. По результатам расчета в программе «Collector Bunch Solver» уровень наведенного напряжения снизился до 12.9кВ (рисунок 5).

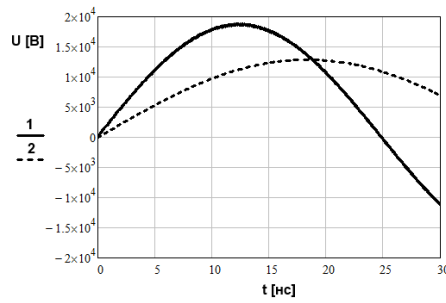


Рисунок 5. Наведенное напряжение на емкости коллектора КИУ-271 (кривая 1) и КИУ-273 (кривая 2)

Экспериментально было подтверждено, что клистрон с коллектором новой конструкции стабильно работает без дополнительных емкостей.

Чтобы учесть влияние наведенного напряжения на динамику сгустков и взаимное влияние сгустков, представленные конструкции коллекторов были исследованы в программе трехмерного моделирования (рисунок 6). Экрану выходного резонатора присваивался фиксированный потенциал земли, коллектор соединялся с экраном выходного резонатора через элемент, имитирующий провод с сопротивлением 1 Ом и индуктивностью 1 мкГн, что соответствовало экспериментально измеренным параметрам внешней цепи источника питания. Величины максимального наведенного напряжения на емкости коллектора, полученные в результате моделирования в трехмерной программе, отличались от рассчитанных величин в программе «Collector Bunch Solver» на 1.2 %, при том, что время расчета в трехмерной программе на 2 порядка больше.

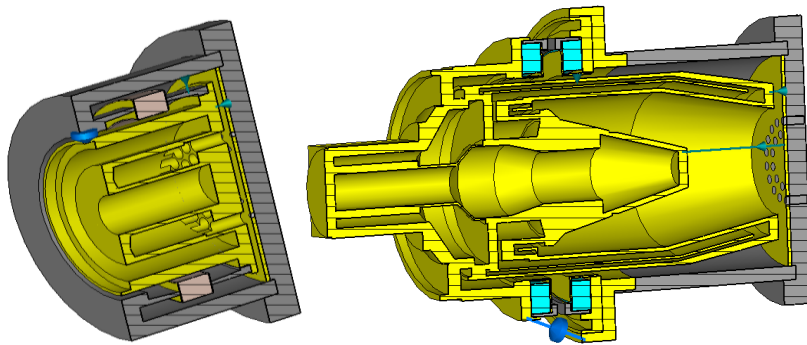


Рисунок 6. Коллектор клистрона КИУ-271 (слева) и КИУ-273 (справа)

На рисунке 7 показано, что в коллекторе клистрона КИУ-273 в статическом режиме электроны теряли порядка 26 кэВ энергии, что могло приводить к возврату электронов, вследствие чего к потере токопрохождения и искажению спектра выходного сигнала.

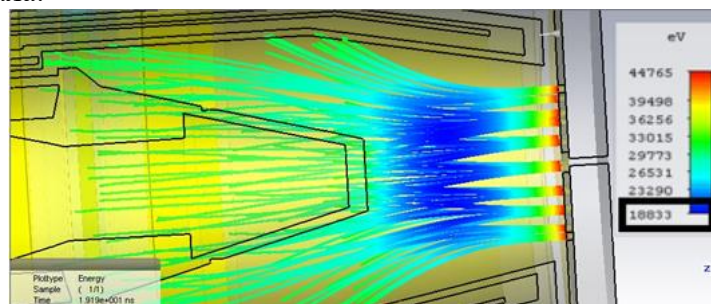


Рисунок 7. Траектории электронов в коллекторе клистрона КИУ-271 в момент максимального наведенного напряжения

По результатам моделирования было показано, что центральный стержень коллектора КИУ-273 не оказывает значительное влияние на величину наведенного напряжения и на потерю энергии электронов, поэтому было решено упростить конструкцию. Чтобы снизить падение энергии пучков электронов, было предложено конструктивное решение в виде дополнительного кольца, припаянного к выходному полюсу резонаторного блока, которое экранирует зазор между коллектором и полюсом выходного резонатора (рисунок 8).

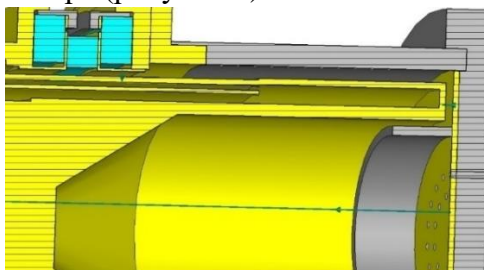


Рисунок 8. Коллектор и полюс выходного резонаторного блока с экранирующим кольцом

В результате уровень наведенного напряжения незначительно снизился до 11.2 кВ (рисунок 9), в то же время потеря энергии пучков электронов уменьшилась на 3 кэВ (на 11.5 %) (рисунок 10)

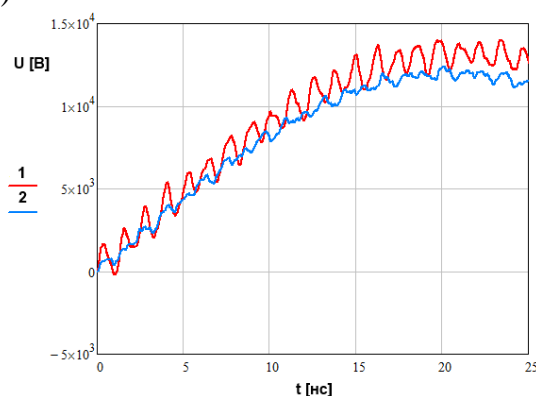


Рисунок 9. Наведенное напряжение между коллектором и экраном выходного блока резонаторов (1 – коллектор КИУ-273, 2 – новый коллектор с кольцом)

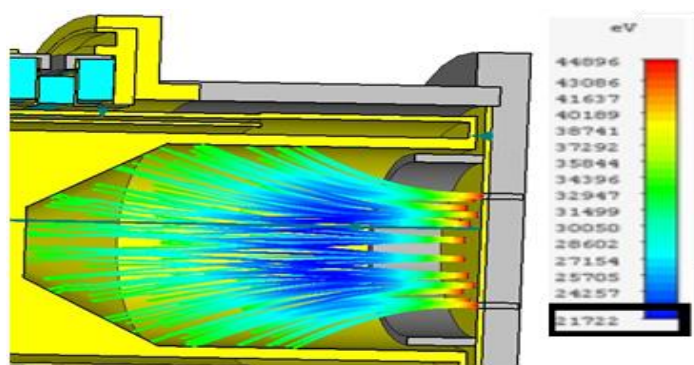


Рисунок 10. Траектории электронов в коллекторе с экранирующим кольцом в момент максимального наведенного напряжения

На рисунке 11 показано изменение распределения электрического поля в новой конструкции коллектора в момент максимального наведенного напряжения. Максимальная величина электрического поля в зазоре снизилась с 14.9 кВ/мм до 9 кВ/мм.

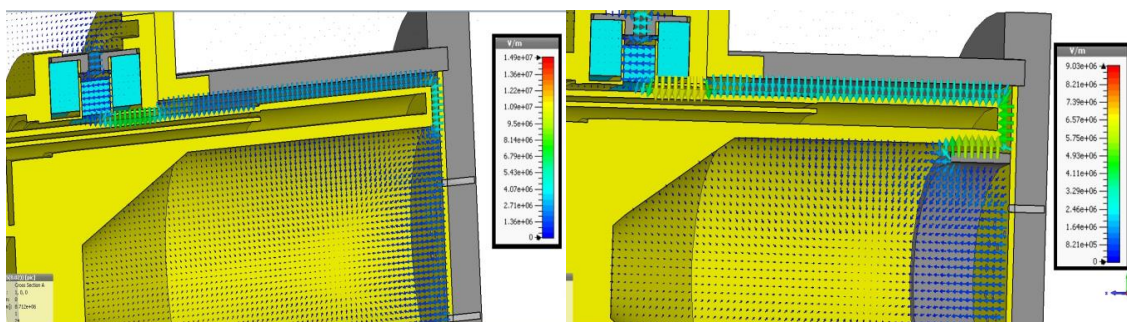


Рисунок 11. Электрическое поле в коллекторе с экранирующим кольцом (справа) и без (слева) в момент максимального наведенного напряжения

Увеличение длины кольца увеличивало емкость коллектора, при этом уменьшало величину максимального наведенного напряжения на емкости коллектора и потерю энергии электронов. Кроме того, уменьшение внутреннего диаметра кольца увеличивало экранирующие свойства его. Но с ростом длины и толщины кольца увеличивался риск осаждения пучка на нем. Так же, уменьшение зазора между кольцом и коллектором было ограничено вероятностью возникновения на данном участке пробоев. Оптимальная конструкция была выбрана на основании расчета траекторий электронов с учетом влияния магнитного поля (рисунки 12)

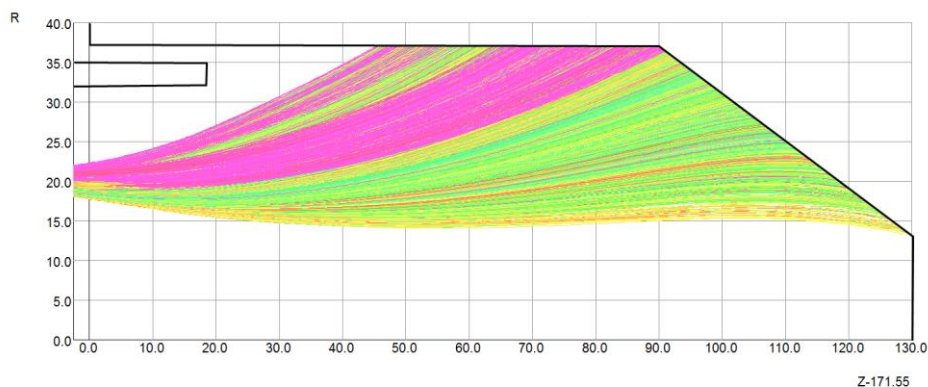


Рисунок 12. Траектории внешнего пучка в магнитном поле в коллекторе

4. Заключение

Было проведено исследование возможностей подавления влияния наведенных напряжений в коллекторе многолучевого клистрона. Добавление экранирующего кольца позволило уменьшить падение энергии пучков электронов на 11.5 % и уменьшить электрическое поле в зазоре между коллектором и экраном выходного резонатора на 39 % при значительном упрощении конструкции.

Список литературы

1. Komarov D. A., Maslennikov S. P., Paramonov Y. N., Yakushkin E. P. Effect of external electrical circuits on the operating conditions of high-power multiple-beam klystron collectors. IVEC 2018
2. Калашников, Д. А., Парамонов Ю. Н. Моделирование наведенных токов коллектора многолучевого клистрона, материалы конференции СТНО 2019