

Влияние внешних электрических цепей на режим работы сильноточных клистронов

Д.А. Комаров, Ю.Н. Парамонов, Д.А. Калашников

АО «НПП «Торий»

Аннотация: в данной работе исследовались способы подавления наведенных токов в коллекторе многолучевого клистрона. Предложен численный алгоритм расчета наведенных токов с использованием теоремы Шокли – Рамо в форме Шокли, которая позволяет отказаться от рассмотрения скоростей частиц при использовании интерполяции зарядов на конечную Эйлерову сетку по методу «частица в ячейке».

Ключевые слова: коллектор, многолучевой клистрон, наведенные токи

1. Введение

Важной проблемой электромагнитной совместимости электронных приборов является проблема наведенных токов. Ни один проводник тока не существует изолированно - отведение проводника к земле каким-либо способом означает связь проводника с элементами внешних цепей, имеющих паразитные индуктивности и емкости. Движению заряда с определенной скоростью на некотором расстоянии от заземленного проводника вызовет на нем возникновение наведенного тока, при этом индуктивность заземляющего отвода и собственная емкость проводника будут придавать некоторую инерцию в изменении наведенного заряда, т.е. фактически появится некоторая электрическая цепь, в которой наведенный движущимся зарядом ток будет, фактически, источником, а значит, вызовет и изменение напряжения на проводнике. Подобный эффект наблюдался во время эксплуатации сильноточного клистрона КИУ-271 в составе мобильного инспекционно-досмотрового комплекса - в клистроне было обнаружено явление искрового разряда между двумя заземленными проводниками (резонаторный блок и коллектор клистрона), разделенными керамическим изолятором, между которыми в вакууме проходил интенсивный электронный поток [1,2]. При этом наблюдался характерный «дребезг» импульса модулятора (рис.1), который приводил к выходу питающего оборудования из строя.

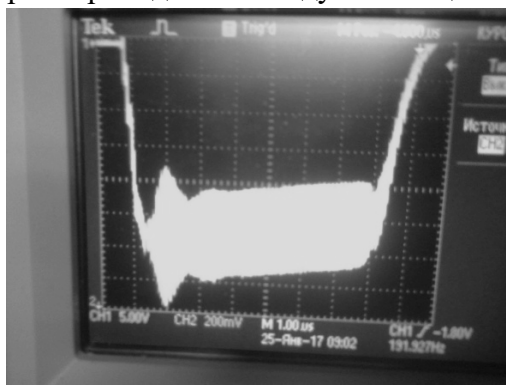


Рисунок 1. Вид импульса модулятора клистрона

Обычным приемом вычисления наведенных токов является использование теоремы Шокли – Рамо, в форме, предложенной Рамо, где наведенный ток определяется в результате умножения величины заряда на скалярное произведение векторов скорости его движения и напряженности фиктивного поля электродов в

точке нахождения заряда. При рассмотрении динамики интенсивных электронных потоков такой подход может вызвать определенные трудности: при использовании метода «частица в ячейке» и нестационарном рассмотрении число частиц в пространстве взаимодействия может исчисляться тысячами и сотнями тысяч, каждая из которых имеет свое значение скорости.

В данной работе предложен численный алгоритм расчета наведенных токов с использованием теоремы Шокли – Рамо в форме Шокли, которая позволяет отказаться от рассмотрения скоростей частиц при использовании интерполяции зарядов на конечную Эйлерову сетку по методу «частица в ячейке».

2. Постановка задачи

Согласно теореме Шокли для двумерной задачи в декартовой системе координат наведенный зарядом на i -м проводнике, потенциал которого равен нулю, определяется величиной влияющих зарядов следующим образом (1):

$$q_n^i = - \sum_j q_j \cdot \varphi_j(x_j, y_j), \quad (1)$$

где q_n^i – наведенный заряд на i -м электроде, q_j – влияющий заряд, $\varphi_j(x_j, y_j)$ – фиктивный потенциал лапласовского поля системы в точке расположения заряда q_j , которое возникло бы, если бы на i -й электрод был подан единичный потенциал. При этом, координаты расположения влияющего потенциала являются решениями уравнения движения, т.е. функциями времени, а сама величина влияющего заряда постоянна. Вычисление суммы (1) представляет явную сложность подобного алгоритма.

Рассмотрим иную схему: пусть на эйлеровой сетке в начальный момент времени осуществлена раздача заряда по методу «частица – в – ячейке». Электронный поток представим в виде набора макрочастиц с элементарным зарядом q_e , которые характеризуются значениями координат x_m и y_m . Далее, заряд в узлах эйлеровой сетки рассчитывается по процедуре взвешивания, например по методу PIC, в котором заряд крупной частицы распределяется между соседними узлами сетки прямо пропорционально расстоянию от x_m и y_m до соответствующего узла. Тогда соотношение (1) можно трактовать иначе: фиктивный лапласовский потенциал определен раз и навсегда решением уравнения Лапласа, влияющий заряд имеет одно и то же расположение в узлах эйлеровой сетки и число влияющих зарядов равно числу узлов, но величина заряда узлов меняется с каждым временным шагом. Наведенный ток соответственно равен отношению разности величин наведенного заряда к временному шагу.

Алгоритм анализа наведенного тока при движении интенсивного электронного потока имеет следующую последовательность: для системы проводников вычисляется распределение фиктивного электрического потенциала путем решения уравнения Лапласа:

Для исследования наведенных токов между резонаторным блоком и коллектором сильнооточного клистрона была рассмотрена математическая модель со следующими исходными допущениями:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = 0 \\ \varphi_i|_S = 1.0, \\ \varphi_j|_S = 0.0 \end{cases}, \quad (2)$$

где φ_i – потенциал проводника, для которого вычисляется наведенный заряд, φ_j – потенциал других проводников.

Далее по PIC методу вычисляются величины зарядов в узлах эйлеровой сетки по распределению крупных частиц и наведенный заряд по соотношению (1). На следующем временном шаге решаются уравнения движения, определяются новые

координаты крупных частиц, производится «взвешивание» заряда на сетке и вычисляются новые значения наведенного заряда. Производится вычисление наведенного тока и алгоритм продолжается в той же последовательности.

Рассмотрим тестовую задачу расчета наведенных токов на сферическом проводнике радиуса a , имеющего нулевой потенциал, под действием возбуждающего положительного заряда, движущегося с постоянной скоростью вдоль прямой линии.

Наведенный ток определяется следующим выражением:

$$I_H = q \cdot v_0 \cdot \frac{a}{(v_0 \cdot t + r_0)^2}, \quad (3)$$

где r_0 – положение заряда в момент времени $t = 0$.

Алгоритм был реализован в среде Visual Fortran. Для решения уравнения Лапласа (2) использовался метод вторичных зарядов [3], в качестве которых были выбраны точечные заряды, расположенные по оси сферы. Удобство данного метода заключается в простоте его численной реализации при наличии открытой границы области и сложной геометрии проводника. Решение уравнения Лапласа, с учетом равенства потенциала на границе сферы единице, сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных величин вторичных зарядов:

$$\|\alpha\| \cdot |q| = |1.0|, \quad (4)$$

где элементы квадратной матрицы α определяются следующим образом:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{\sqrt{r_{ni}^2 + (z_{ni} - z_{nj})^2}}, \quad (5)$$

где r_{ni} , z_{ni} – координаты точек на поверхности сферы (точки наблюдения), а z_{nj} – координаты вторичных зарядов (источников). Решение СЛАУ было получено итерационным методом минимальных невязок. Максимальное отклонение потенциала при 20 вторичных зарядов составило 0.15%. Второй метод контроля связан с использованием выражения (3). Принимая, что возбуждающий заряд нормирован к единице и расположен на расстоянии двух радиусов сферы, наведенный заряд равен 0.5. Вычисленный наведенный заряд по соотношению (1) составил 0.4997, т.е. погрешность составила 0.06%.

«Взвешивание» заряда на эйлеровой сетки проводилось методом NGP. Максимальная погрешность составила 0.5%.

Приведенный метод расчета наведенных токов был использован для исследования влияния внешней цепи на работу мощного сильноточного клистрона. В качестве эквивалентной схемы использовалась схема (рисунок 2).

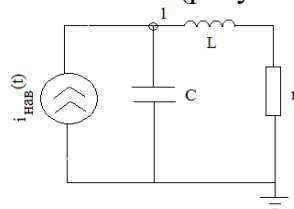


Рисунок 2 Эквивалентная схема коллектор-внешняя цепь источника питания

Струтки, попадая в пространство коллектора, наводят ток (J), который вызывает изменения напряжения через емкость коллектора (U_C) и тока через индуктивность внешней цепи питания (I_L). Переходные процессы данной схемы описываются двумя дифференциальными уравнениями (9):

$$\begin{cases} \frac{dU_C}{dt} = \frac{J(t)}{C} - \frac{i_L(t)}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{U_C(t)}{L} - \frac{i_L(t) \cdot R}{L} \end{cases}, \quad (9)$$

Для решения представленной системы уравнений использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Начальные значения тока через индуктивность внешней цепи и напряжения через емкость коллектора задавались на основании законов коммутации.

3. Результаты расчета и эксперимента

В результате расчета конструкции клистрона КИУ-271 (рисунок 3) 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 4).



Рисунок 3 Распределение электростатического поля в коллекторе КИУ-271

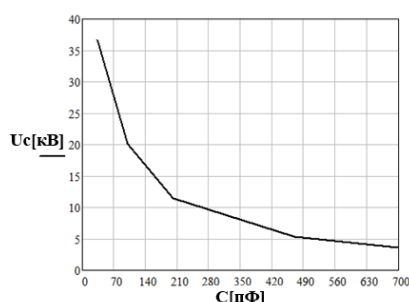


Рисунок 4 Зависимость наведенного напряжения на емкости коллектора от величины емкости

Представленная зависимость была подтверждена экспериментально. При внесении дополнительной емкости до 470 пФ во внешнюю цепь коллектора удалось улучшить токопрохождение вплоть до 90%. На рисунке 5 показан импульс модулятора клистрона при внесении дополнительной емкости.

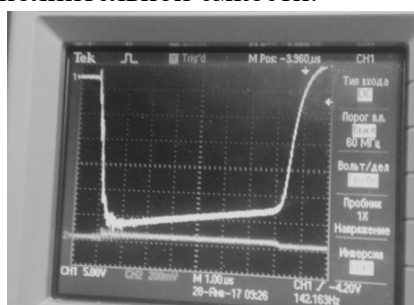


Рисунок 5 Вид импульса модулятора клистрона с дополнительной емкостью

Так как введение дополнительных емкостей не всегда целесообразно, был

разработан новый клистрон КИУ-273, в котором было решено увеличить емкость коллектора конструктивно, уменьшив величину зазора между коллектором и экраном резонаторного блока и продлив данный участок. На рисунке 6 представлено распределения электрического поля коллектора КИУ-273.



Рисунок 6 Распределение электростатического поля в коллекторе КИУ-273

Емкость новой конструкции коллектора составила 134 пФ, а уровень наведенного напряжения снизился до 12.9 кВ. Клистрон с новой конструкцией коллектора показал стабильную работу в составе МИДК при общем токе до 155 А. При этом в процессе эксплуатации клистрона КИУ-273 пробои не возникали. Токопрохождение улучшилось с 90% до 94%.

4. Заключение

Проведено исследование наведенных токов между резонаторным блоком и коллектором сильноточного клистрона. В результате расчетов был создан мощный сильноточный клистрон КИУ-273, показавший стабильную работу в составе МИДК.

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. Alexander N. Darmaev, Dmitry A. Komarov, Yury N. Paramonov, Denis A. Kalashnikov Simulation of collector induced voltage in high-power multiple-beam klystron, IVEC 2019
3. А.В. Вашковский, В.Т. Овчаров К нахождению распределения потенциала в области ограниченной электродами заданной формы с заданными потенциалами (Электронная техника. Серия 1 Электроника СВЧ №9, 1971)