

# **Влияние собственного магнитного поля электронного потока на его транспортировку в мощных многолучевых клистронах**

**В.М. Саблин, Р.А. Осин, В.И. Оконенко**

АО «НПП «Торий»

**Аннотация:** в работе представлены результаты моделирования транспортировки электронного потока в различных магнитных системах. Показано, что в мощных клистронах учёт собственного магнитного поля электронного потока является существенным фактором для достижения требуемого значения токопрохождения. Предложен способ компенсации смещения электронного потока на основе магнитных систем с периодической фокусировкой.

**Ключевые слова:** многолучевой клистрон, собственное магнитное поле, электронно-оптическая система

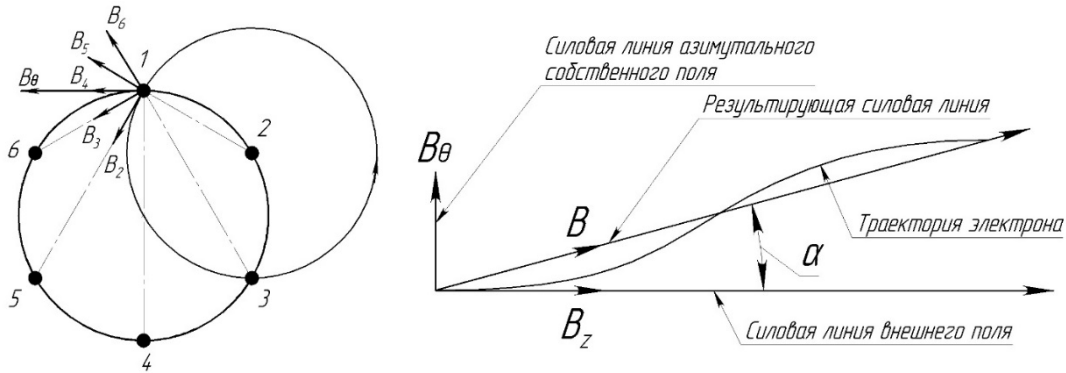
## **1. Введение**

В настоящее время в нашей стране реализуются несколько программ создания проектов класса «мегасайнс». К ним относятся, например, курчатовский источник синхротронного излучения («КИСИ-Курчатов»), ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), Сибирский кольцевой источник фотонов («СКИФ») и др. В таких комплексах ускорение заряженных частиц происходит за счет энергии СВЧ поля, источником которого служат клистроны. К данным приборам предъявляются требования высокого уровня выходной мощности, достигающей нескольких десятков и даже сотен МВт. Традиционно для достижения подобных результатов используют устройства, представляющие собой однолучевую лампу с фокусирующей системой на основе соленоида. Преимуществом такой конструкции является относительная простота в разработке и изготовлении, а также обеспечение легкой настройки изделия путём изменения тока соленоида. К недостаткам можно отнести высокое ускоряющее напряжение. Так у однолучевого клистрона с выходной мощностью 20 МВт рабочее напряжение составляет около 250 кВ, которое вынуждает использовать специальную защиту от рентгеновского излучения. Также повышаются требования к клистронному блоку, куда устанавливается прибор, и увеличивается сложность проектирования источников питания. Одним из способов решения данной проблемы является переход к многолучевой конструкции, однако использование нескольких мощных электронных лучей приводит к необходимости учёта их взаимного влияния, обусловленного собственными магнитными полями. Оценке этого влияния на транспортировку электронных пучков и способам компенсации описанного эффекта посвящена данная статья.

## **2. Постановка задачи**

Явление возникновения магнитного поля вокруг прямолинейного проводника тока хорошо известно. Силовые линии такого поля представляют собой замкнутые концентричные окружности. В изделиях с сильноточными электронными потоком наличие собственного магнитного поля потока позволяет снизить уровень внешнего фокусирующего поля соленоида или постоянных магнитов [1]. При наличии нескольких электронных потоков их собственные магнитные поля образуют единое

азимутальное поле, центр которого совпадает с геометрическим центром всех лучей. В связи с этим на каждый отдельный поток начинает действовать азимутально направленное отклоняющее поле. Вкупе с внешним фокусирующим магнитным полем они формируют силовые линии, наклонённые к оси, вдоль которой летит электронный поток. В результате траектории электронов «навиваются» на результирующую силовую линию (рисунок1).



**Рисунок 1.** К вопросу влияния собственных магнитных полей электронных потоков на их транспортировку.

Оценить отклонение, вызываемое собственным полем можно следующим образом. Исходя из закона Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля одиночного бесконечного прямолинейного проводника (луча) с током  $I_k$  на расстоянии  $r$  будет равна

$$B_l = \frac{2 \cdot I_k}{r}. \quad (1)$$

В случае  $N$  лучей влияние каждого из них может быть определено из геометрических соотношений в соответствии с рисунком 1. Суммарное поле  $B_\Sigma$ , действующее на один луч, представляет собой суперпозицию собственных магнитных полей всех остальных лучей. Угол наклона результирующей силовой линии, вдоль которой перемещаются электроны, определяется отношением азимутальной компоненты суммарного отклоняющего собственного магнитного поля к внешнему фокусирующему полю. Соответственно, общее смещение пучка на длине  $L$  находится из выражения

$$\Delta r = L \cdot \frac{B_\Sigma}{B_z}, \quad (2)$$

где  $B_z$  – продольная составляющая индукции внешнего фокусирующего магнитного поля. Из этого выражения следует, что смещение электронного потока относительно канала обратно пропорционально уровню внешнего фокусирующего поля.

### 3. Результаты моделирования

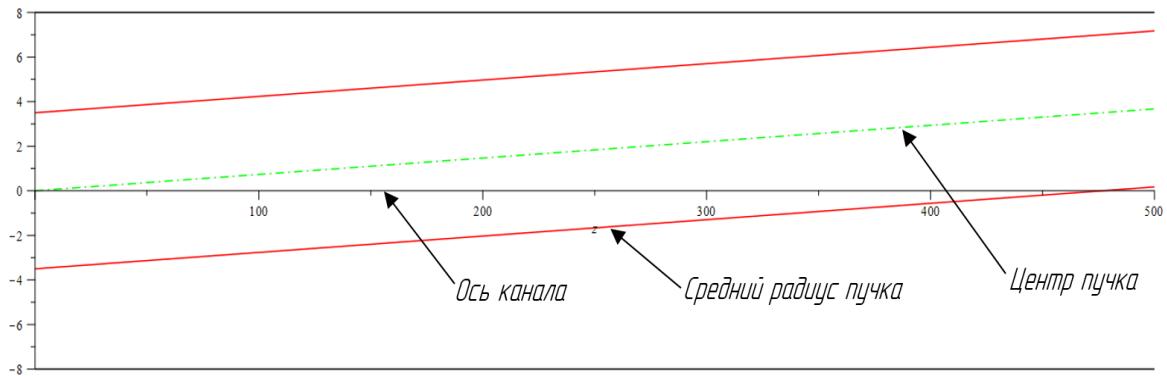
В качестве исследуемого прибора был выбран клистрон, основные параметры электронно-оптической системы которого представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Основные параметры исследуемого клистрона

| Параметр, ед. изм.           | Значение |
|------------------------------|----------|
| Ускоряющее напряжение, кВ    | 180      |
| Ток суммарный/парциальный, А | 282/47   |
| Количество лучей             | 6        |

|  |     |
|--|-----|
| Диаметр канала, мм   | 16  |
| Длина резонаторного блока, мм                                  | 500 |
| Диаметр расположения лучей, мм                                 | 80  |
| Бриллюэновское поле без учёта собственного магнитного поля, Гс | 800 |

В соответствии с формулой (2), отклонение электронного потока в постоянном поле составляет 3.67 мм или 46 % от радиуса канала (рисунок 2).



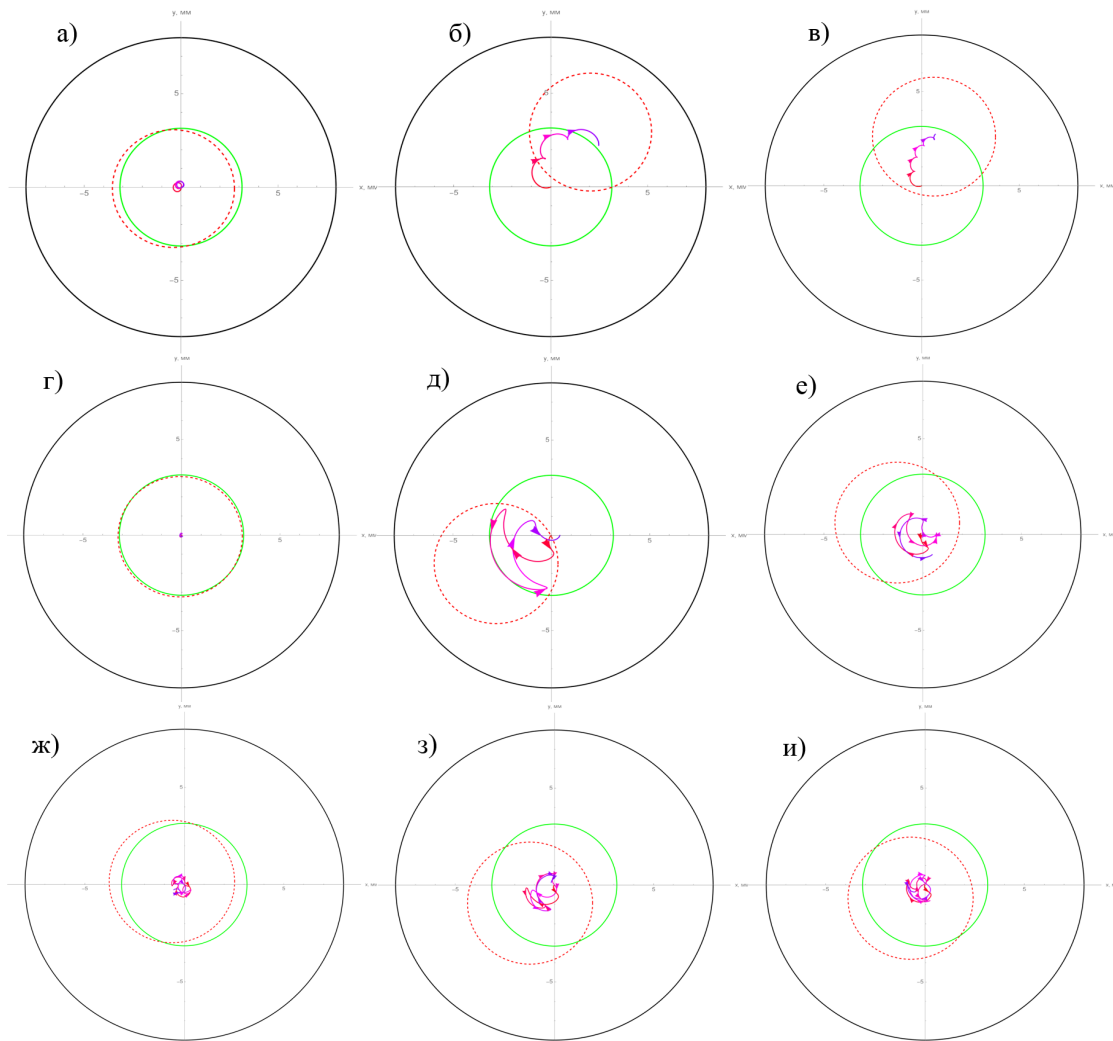
**Рисунок 2.** Оценка смещения электронного потока относительно оси канала.

Для подтверждения оценки отклонения электронного пучка было проведено моделирование траекторий электронов в пакете прикладных программ, использующих в своей основе метод конечных элементов. Моделирование траекторий движения электронов было проведено для трёх вариантов фокусирующей системы: периодическая система на постоянных магнитах, реверсивная система на постоянных магнитах и соленоид. Их параметры представлены в таблице 2, а соответствующие графики распределения  $B_z$  – на рисунке 4. Для всех вариантов дополнительно проведен траекторный анализ в магнитном поле с увеличенной амплитудой. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

**Таблица 2.** Основные параметры исследуемых фокусирующих систем

| Параметр, ед. изм.                                | Значение |       |       |
|---|----------|-------|-------|
|   | Соленоид | МРФС  | МПФС  |
| Амплитудное значение индукции магнитного поля, Тл | 0.075    | 0.080 | 0.090 |
| Период, мм  | –        | 200   | 110   |
| Параметр магнитного поля                          | –        | 0.396 | 0.152 |

Расчеты показали, что при использовании знакопеременных внешних фокусирующих полей удастся частично скомпенсировать отклонение электронного потока относительно пролетного канала. Данный эффект достигается благодаря смене направления результирующей компоненты магнитного поля. При этом максимальное смещение пучка тем больше, чем больше период магнитной системы.



**Рисунок 3.** Смещение электронного потока в канале транспортировки: а) – в поле соленоида без учета собственного магнитного поля, б) – в поле соленоида с учетом собственного магнитного поля, в) – в поле соленоида с учетом собственного магнитного поля и с увеличенной амплитудой  $B_z$ ; г) – в поле МРФС без учета собственного магнитного поля, д) – в поле МРФС с учетом собственного магнитного поля, е) – в поле МРФС с учетом собственного магнитного поля и с увеличенной амплитудой  $B_z$ ; ж) – в поле МПФС без учета собственного магнитного поля, з) – в поле МПФС с учетом собственного магнитного поля, и) – в поле МПФС с учетом собственного магнитного поля и с увеличенной амплитудой  $B_z$ .

Внешний круг – граница канала транспортировки, внутренний сплошной круг – начальное положение пучка, внутренний пунктирный круг – максимальное смещение пучка.

На рисунке 5 показано сравнение результатов аналитического расчета и численного моделирования траекторий электронного потока во внешнем фокусирующем поле соленоида, по результатам которого можно сделать вывод о правомерности использования представленного подхода для оценки влияния собственных магнитных полей электронных пучков.

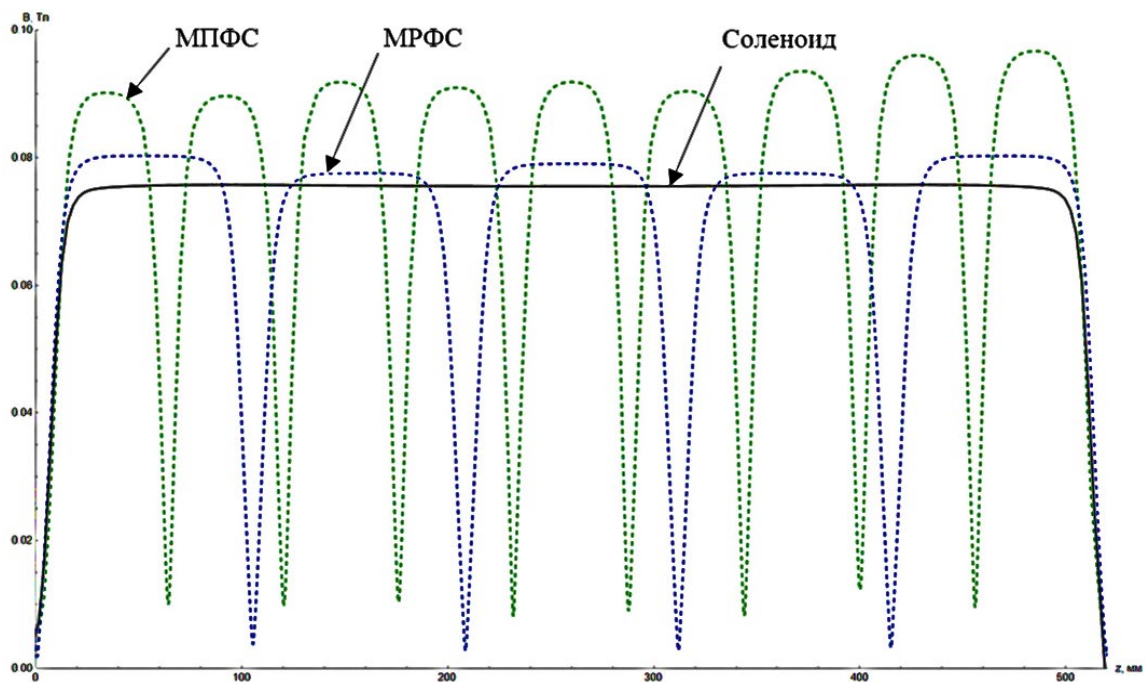


Рисунок 4. Распределение  $B_z$  фокусирующих систем.

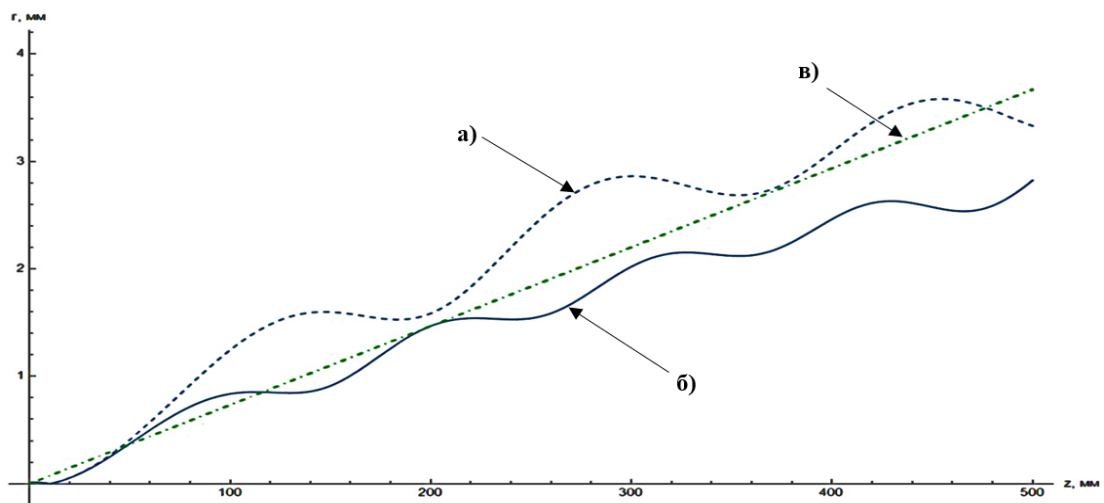


Рисунок 5. Траектории центрального электрона в поле соленоида: а) – с учетом собственного магнитного поля, б) – с учетом собственного магнитного поля и увеличенной амплитудой  $B_z$ , в) – результат аналитического решения.

#### 4. Выводы

Из результатов моделирования следует, что собственные магнитные поля приводят к значительным колебаниям и смещениям электронного потока относительно оси пролётного канала. Использование периодических и реверсивных магнитных систем позволяет частично компенсировать этот эффект, однако их применение в данном классе приборов ограничено ввиду сложности настройки.

#### Список литературы

1. Дармаев А. Н. и др. Выбор амплитуды магнитного поля реверсивной фокусирующей системы для мощного релятивистского многолучевого клистрона с учетом собственного электрического и магнитного поля пучка // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), том 1, 2019, с. 108 -111.