

Опыт моделирования сверхмощного клистрона с неоднородным постоянным фокусирующим магнитным полем

А.Н. Юнаков, К.Г. Симонов, Д.А. Комаров, Н.А. Голованов

АО «НПП «Исток» им. Шокина» г. Фрязино

Аннотация: в данной работе проведено численное моделирование пространства взаимодействия однолучевого сверхмощного клистрона с фокусировкой неоднородным постоянным магнитным полем. Показано, что выходные параметры существенно зависят от заполнения электронного потока канала транспортировки. Представлены результаты сопоставления экспериментальных данных и численного моделирования.

Ключевые слова: клистрон, заполнение, электронный КПД

1. Введение

В Российской Федерации в соответствии с Национальной программой «Наука и университеты», в 2027 г. на базе Института Физики Высоких Энергий г. Протвино, который на сегодняшний день является одним из подразделений Института Атомной Энергии имени Курчатова, должен быть запущен синхротронный комплекс «СИЛА» - Синхротрон и Лазер, который по своим техническим параметрам не будет иметь аналогов в мире. В комплекс будет входить 40 экспериментальных лабораторий в самом широком спектре исследований, но основным направлением будет физика твердого тела. Ожидается, что на базе источника «СИЛА» будут отработаны новые технологии создания полупроводниковых элементов. Комплекс будет состоять из линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) – инжектора на выходную энергию 6 ГэВ и синхротрона – накопителя с периметром около 1 км.

Планируемый ЛУЭ будет работать на частоте 2800 МГц, количество регулярных волноводных ускоряющих секций 120, при длине каждой секции порядка 3 м. Проектные параметры по току электронного потока составляют 400 мА в импульсе, т.е. представляют существенную нагрузку током и требуют обеспечения в каждой секции ввода СВЧ мощности не менее 20 МВт в импульсе. Таким образом общая схема СВЧ питания ЛУЭ будет содержать 120 клистронов, каждый из которых работает на свою волноводную секцию. Таким образом для проекта «СИЛА» суммарная пиковая мощность составит рекордные 2,4 ГВт. В качестве источника СВЧ мощности для крупных ускорительных комплексов используют клистронные усилители в связи с рядом факторов: высокая стабильность частоты СВЧ сигнала, простота управление мощностью клистронного усилителя входным сигналом низкого уровня, отсутствие побочных колебаний и т.д.

В работе представлены результаты численного моделирования однолучевого сверхмощного клистрона с фокусировкой постоянным магнитным полем, имеющим существенное нарастание вдоль аксиальной оси прибора, что приводит к медленному уменьшению радиуса интенсивного электронного потока к выходному резонатору. Показано, что использование одномерных моделей, например по программе AJDisk, вносит существенную ошибку в расчете пространства взаимодействия. Программа KLYS WIN позволяет учесть изменение радиуса потока и дать результаты, количественно соответствующие практике. Представлено сопоставление результатов моделирования в нескольких программных продуктах с экспериментом.

2. Моделирование и экспериментальные результаты

Клистрон для ЛУЭ комплекса «Сила» представляет собой металлокерамическую конструкцию, состоящую из пяти цилиндрических однолучевых резонаторов с коаксиальным вводом энергии в первом резонаторе и волноводным выводом энергии в сечении 90х45 в пятом резонаторе. Фокусирующей системой клистрона является соленоид, структура которого обеспечивает плавное нарастание величины индукции магнитного поля к выходному резонатору, при чем перепад индукции магнитного поля составляет более 1.7 раза. Известно [1], что одномерное приближение при моделировании пространства взаимодействия клистрона предполагает неизменность радиуса электронного потока, что в принципе не позволяет обеспечить сколь ни будь приемлемую точность в определении режима насыщения выходной мощности. Модификация программы KLYS WIN позволяет учесть изменение заполнения электронным потоком канала транспортировки по средствам введения радиуса расчета напряженности электрического поля, которое в свою очередь вычисляется строго методом конечных разностей для реальной геометрии резонатора.

Анализ электроники был проведен для режима работы 244 кВ напряжения катода при 204 А импульсного тока.

На рисунке 1 даны результаты сопоставления расчета и эксперимента при различных значениях тока соленоида, т.е. при различных заполнениях электронного потока. При этом в модели оптимизация была проведена для режима 18 А, после чего расчет для 17 и 16 А был проведен при тех же числовых данных по частотам резонатора только путем пропорционального увеличения заполнения.

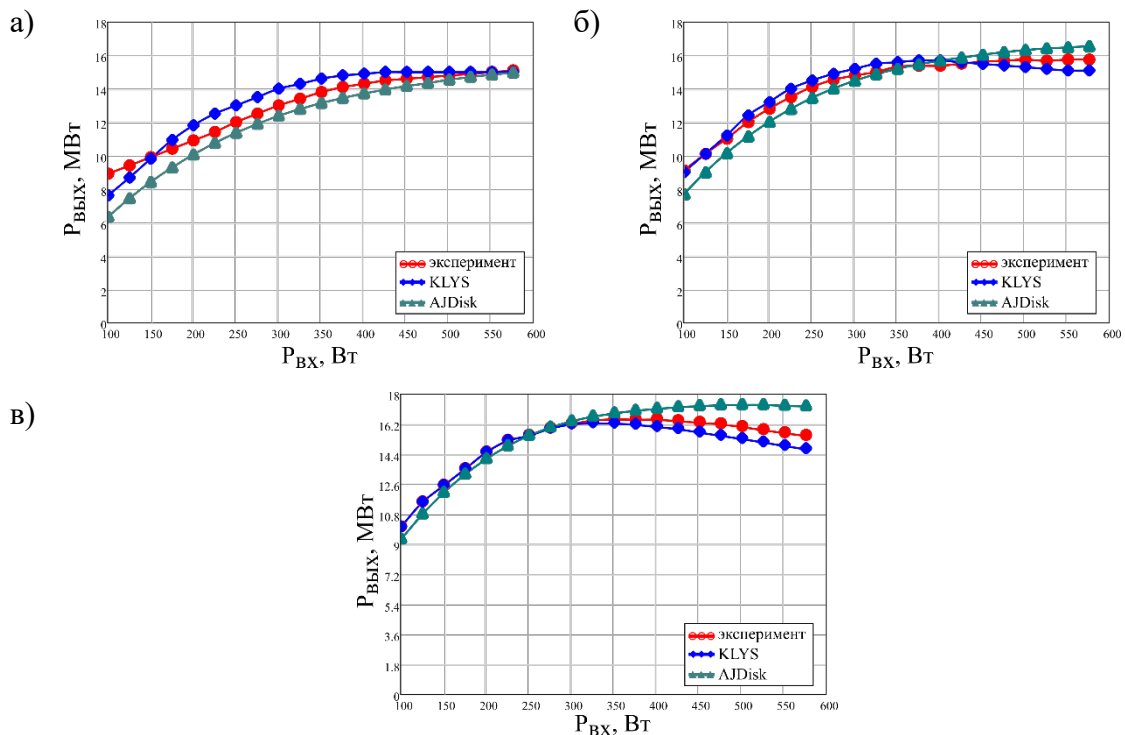


Рисунок 1. а) зависимости выходной мощности клистрона от входной при токе соленоида 18 А; б) зависимости выходной мощности клистрона от входной при токе соленоида 17 А; в) зависимости выходной мощности клистрона от входной при токе соленоида 16 А

Необходимо сказать, что наилучшее соответствие получено при изменении радиуса расчета электрической составляющей СВЧ поля с уменьшением к концу пространства взаимодействия, что соответствует росту магнитной индукции по длине прибора. При постоянстве радиуса результаты расчета и эксперимента существенно

отличаются – более чем на 17% по мощности насыщения и более чем на 20% по КПД. В этом смысле задача явно показывает, что изменение поля вдоль оси прибора вносит существенный вклад в электронику прибора и его необходимо учитывать. В таблице 1 даны величины заполнения для каждого резонатора.

Таблица 1. Параметры заполнения для режима 16А

Номер резонатора	I	II	III	IV	V
Заполнение	0.530	0.530	0.429	0.365	0.278

На рисунке 2 представлена зависимость КПД от проводимости электронного потока для улучшенной конструкции клистрона. Характерной особенностью является рост погрешности расчета при малой проводимости электронного потока, что может быть объяснено изменением длины волны пульсации при низких напряжениях питания и существенным отличием заполнения канала транспортировки в данном режиме.

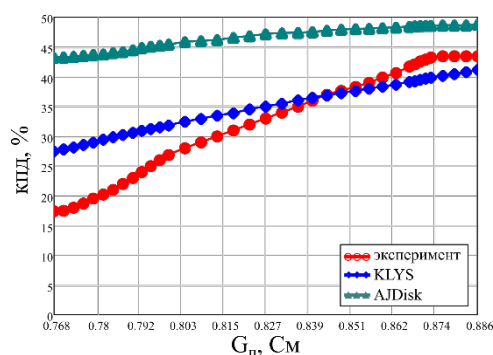


Рисунок 2. Зависимости проводимости электронного потока

На рисунке 3 представлена огибающая электронного потока вместе с профилем магнитного поля в нормализованном виде. Магнитное поле отнесено к максимальной амплитуде, продольная координата к длине профиля магнитного поля, поперечная координата нормирована на радиус пролётного канала.

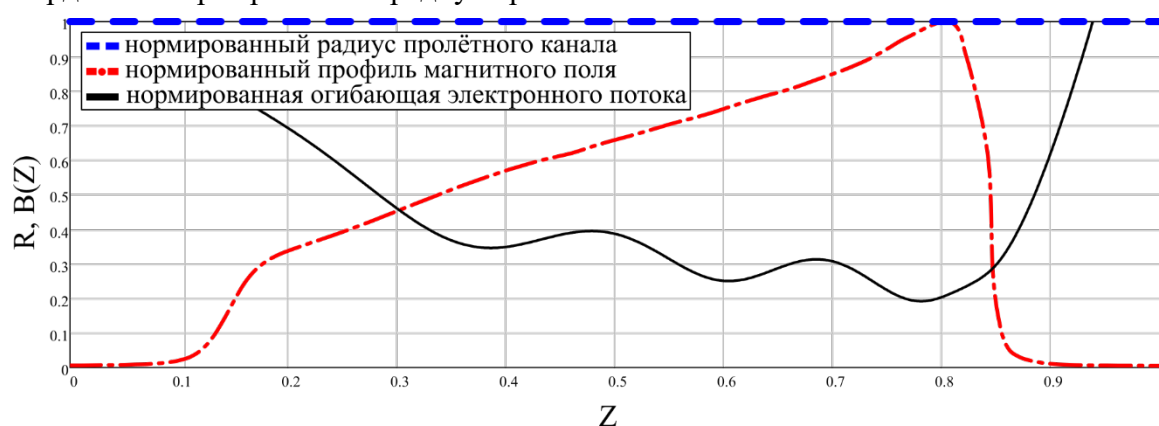


Рисунок 3. Контур электронного потока в магнитном поле (нормализованный вид)

Контур электронного потока показывает, что по мере прохождения потока в пролётном канале его заполнение уменьшается, что необходимо учитывать при моделировании пространства взаимодействия клистрона.

3. Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования пространства взаимодействия сверхмощного клистрона с фокусировкой неоднородным магнитным полем. Показано на основании сопоставления результатов численного моделирования и экспериментальных результатов, проведенных для различных значений индукции магнитного поля на оси системы, необходимость учета в модели взаимодействия изменения заполнения канала транспортировки.

Список литературы

1. G. Caryotakis High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center. – 2004. SLAC-PUB 10620.