

УДК 621.385.624

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСИЛЕНИЯ В МНОГОЛУЧЕВОМ КЛИСТРОНЕ

Р. В. Егоров, В. Л. Саввин

Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр.2

Статья поступила в редакцию 23 мая 2019 г.

Аннотация. Впервые проведено трёхмерное моделирование электронных процессов в мощных многолучевых клистронах, вызванное необходимостью детального анализа процессов усиления с целью нахождения объективных физических причин ограничения КПД. Результаты проведенного трехмерного моделирования процессов усиления показали, что в различных каналах они проходят по-разному, распределение СВЧ поля является неравномерным, заметное влияние оказывает несимметричность устройств связи для ввода и вывода энергии, а также высшие моды колебаний в применяемых сверхразмерных резонаторах.

Ключевые слова: многолучевые клистроны, трехмерное моделирование, группировка.

Abstract. Three-dimensional modeling of electronic processes in powerful multibeam klystrons was performed for the first time, caused by the need for detailed analysis of the amplification processes. The main purpose of the simulation was to identify the main physical factors limiting the efficiency of signal amplification in multibeam structures, rather than optimizing the parameters of a particular klystron in order to achieve maximum efficiency. The 40-beam nine-resonator BAC – klystron with an electron beam power of 10.4 MW, operating at a frequency of 2.99 GHz. was chosen as prototype of the model. The results of the three-dimensional simulation of amplification processes showed that beams in different channels propagate differently and calculation of output parameters of multibeam klystrons cannot be performed by "mechanical" multiplication of optimized results obtained in single-beam programs by the number of beams.

The results obtained gave a possibility to observe a three-dimensional "picture" of electronic processes in a multibeam klystron for the first time, although the calculated efficiency values differed from the experimental values. This is due to the fact that during simulation a constant level of the external focusing magnetic field 850 GS was used. In the experiment, the value of the magnetic field increased along the device from 850 up to 1350 Gs. Therefore, in the simulation, the electron bunches were less compact before the entrance of output resonator decreasing the final efficiency.

In addition, the simulation demonstrated that the input loop reduces the amplitude of high-frequency fields and characteristic resistance in the channels of the input resonator, causing a significant difference in the amplitude of the electric field of the main mode in different channels. Therefore, the electrons in the channels located near the power input are grouped worse and experience weaker braking in the output resonator. In the experimental prototype these disadvantages have been eliminated "manually" by tuning of the resonator. Thus, the results of the three-dimensional simulation of multibeam klystron showed that amplification processes occur in different ways at different channels, the distribution of the microwave field is non-uniform, the asymmetry of the input and output coupling devices has a noticeable effect, as well as the higher modes of oscillations in the used oversized resonators.

Key words: multibeam klystrons, three-dimensional modeling, grouping.

1. Введение

Для понимания происходящих физических процессов в многолучевом приборе О-типа важно исследовать задачу динамики электронных пучков в электромагнитных полях, используя современные трёхмерные программные пакеты. Среди основных причин необходимости такого рассмотрения можно выделить следующие:

1) КПД расчётных клистронов больше КПД реальных приборов на 10-20%. Одномерный анализ электронных процессов не выявляет объективных причин такого расхождения результатов. Оптимизированный процесс усиления в одном пролетном канале клистроны, полученный в одномерной теории,

механически «умножается» на число лучей и даёт завышенный результат. На практике процессы усиления в различных каналах могут отличаться друга от друга, и в результате экспериментальный КПД будет меньше от предсказанного значения в одномерной теории.

2) В экспериментах выявлены «расстройки» параметров резонаторов, в частности, во входном и выходном резонаторе из-за несимметричного расположения петли и щели связи относительно каналов резонаторов. Для увеличения КПД экспериментальных образцов потребовалась «ручная» доводка резонаторов для выравнивания частот и характеристического сопротивления во всех каналах резонаторов.

3) Увеличение числа лучей в мощных клистродах и применение кольцевых резонаторов неизбежно приводит к значительному увеличению диаметра резонаторов и, соответственно, к изменению модового состава СВЧ колебаний в резонаторах. В исследованных образцах мощных клистронов с числом лучей равным 40 поперечные размеры кольцевых резонаторов становятся сравнимыми с длиной волны резонансных колебаний. Поэтому можно ожидать заметного искажения результирующего высокочастотного поля в пролётных каналах из-за возбуждения высших мод колебаний в резонаторах.

Все вышеприведенные обстоятельства вызывают необходимость детального 3D – анализа процессов в мощных многолучевых клистродах с целью нахождения объективных физических причин ограничения КПД.

Также было важным научиться ставить задачи, определить время расчёта, сетку разбиения, количество заряженных частиц в трёхмерных программных пакетах, поскольку до этого исследователи и разработчики использовали только одномерные и двумерные программные комплексы. Такая задача трёхмерного моделирования электронных процессов в мощных многолучевых приборах О – типа ставится впервые.

Для решения поставленной задачи был выбран метод Particle-In-Cell («Частица в ячейке»). Particle-In-Cell («Частица в ячейке») – трёхмерный пакет для моделирования динамики заряженных частиц в 3D электромагнитных

полях во временной области, позволяющий выполнить расчет траекторий заряженных частиц в этих полях на всех частотах с учетом влияния пространственного заряда, релятивистских эффектов и вторичной электронной эмиссии и т.д.

Необходимо отметить ограничения применявшегося метода к решению трехмерной задачи. Во-первых, внешнее фокусирующее магнитное поле приходится задавать вдоль оси многолучевого клистрона, а не вдоль осей каналов. Поэтому применяемый метод «аксиального приближения» для расчёта неоднородного магнитного поля в однолучевых конструкциях здесь уже не применим, и приходится рассматривать процессы в постоянном вдоль всей длины клистрона магнитном поле. Во-вторых, необходимо разработать алгоритмы выравнивания характеристических параметров разных пролётных каналов.

Поэтому основной целью проведенного моделирования являлось выявление основных физических факторов, ограничивающих эффективность процесса усиления СВЧ сигнала в многолучевых конструкциях, а не оптимизация параметров клистрона с целью достижения предельных КПД.

2. Результаты численного трехмерного моделирования динамики клистрона

Для численного 3D – моделирования электронных процессов усиления была выбрана конструкция экспериментально разработанного 6 МВт многолучевого клистрона, описанного ранее [1-3].

На рисунке 1 представлен 40-лучевой девяти резонаторный БАК – клистрон с постоянной мощностью электронного пучка 10,4 МВт, работающий на частоте 2,9985 ГГц, через 200 нс после начала эмиссии электронов. С левой стороны рисунка изображена коаксиальная линия, с помощью которой осуществляется передача входного сигнала в первый резонатор клистрона. Микроволновая мощность выводится через волновод с помощью щели связи с выходным резонатором.

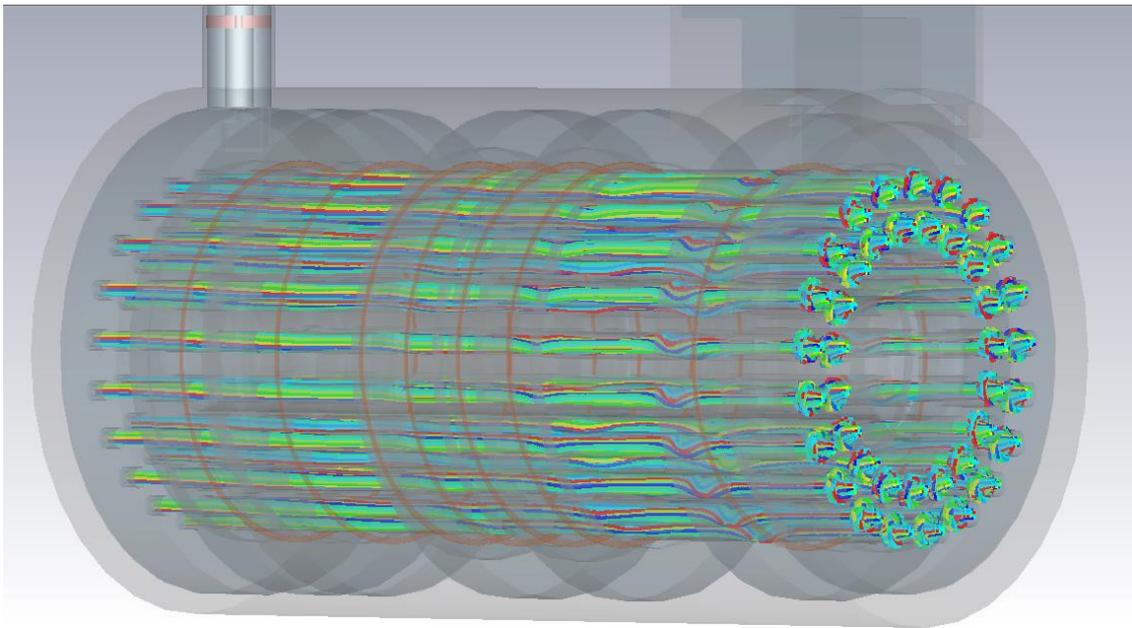


Рис. 1. Модель многолучевого клистрона в трёхмерном программном комплексе с траекториями электронов.

Таблица 1. Параметры анализируемого многолучевого клистрона

Параметр	Единица измерения	Значение
Частота сигнала, f_0	ГГц	2,9985
Ток пучка, I_0	А	200
Количество пучков, N_b		40
Напряжение пучка, U_0	кВ	52
Внешнее магнитное поле, B_z	Гс	850
Мощность входного сигнала, P_{in}	Вт	30
Время расчёта, t_{calc}	Нс	200
Число эмиттированных РЭС частиц		800
Общее число частиц		> 2 500 000
Количество ячеек сетки		8 000 000

Для настройки добротности всех промежуточных резонаторов и исключения перегруппировки электронов в первых резонаторах необходимо вводить диэлектрические поглотители. Добротности Q_0 резонаторов с идеальными проводящими стенками без введения поглощающего материала имеют значения свыше 7000. Тангенс угла потерь в диэлектрическом поглотителе во всех ненагруженных, промежуточных резонаторах подбирается таким образом, чтобы добротности этих резонаторов Q_0 соответствовали

экспериментальным значениям ($\sim 3500 \div 4000$).

В таблице 1 представлены параметры многолучевого клистрона, которые использовались при моделировании и расчёте в трёхмерном программном пакете.

По результатам оптимизации внешнего фокусирующего магнитного поля в статическом режиме, частот всех резонаторов в отсутствие электронного потока, собственных добротностей промежуточных резонаторов, нагруженных добротностей входного и выходного резонаторов, конфигурации петли связи во входном резонаторе, проводимости входного резонатора с пучками электронов, уровня входного сигнала была получена зависимость выходного сигнала (рис. 2) в выходном волноводе.

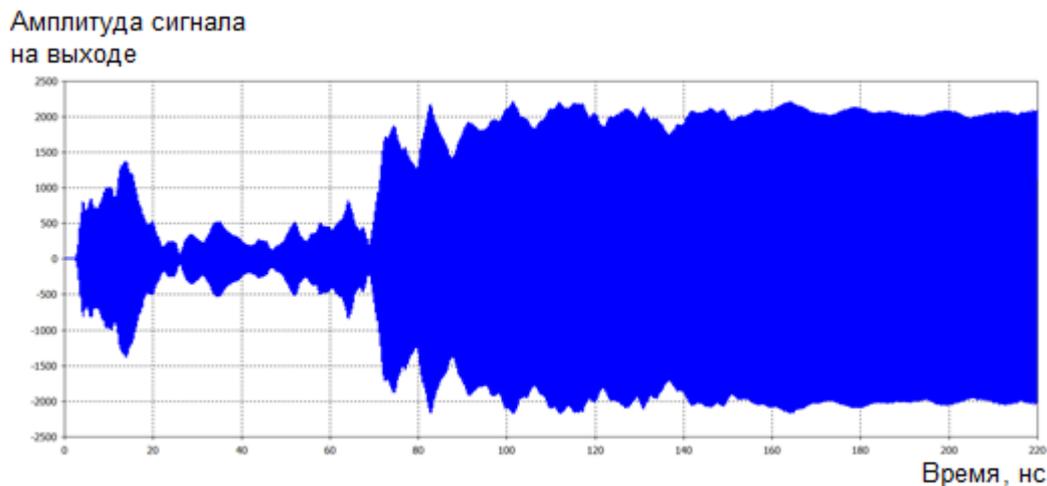


Рис. 2. Зависимость амплитуды выходного сигнала в волноводе от времени.

Общее время расчёта на ПК с количеством «частиц в ячейке» 800 (по 20 PIC частиц в каждом канале 40-лучевого клистрона) и количеством ячеек 8 000 000 составляет ориентировочно 180 часов.

Промежуточные, высокодобротные ($Q_0 \sim 3500 \div 4000$) резонаторы достаточно долгое время запасены энергией после возмущения первыми пролетевшими электронами, поэтому в многолучевой конструкции клистрона с кольцевыми резонаторами требуется достаточно долгое время для установления стационарного режима (рис. 2), около $150 \div 160$ нс, что составляет примерно 500 периодов высокочастотного поля. До времён порядка

100 нс, пока не установился стационарный режим в предвыходных резонаторах, наиболее заметны влияние отраженных волн электронов. В стационарном режиме возникают небольшие биения амплитуды выходного сигнала из-за разности частот седьмого и восьмого резонатора ($f_8 - f_7 = 1/14 \text{ нс} = 70 \text{ МГц}$), в которых сосредоточены ВЧ электромагнитные поля со значительными амплитудами по сравнению с другими промежуточными резонаторами. Эти резонаторы отвечают за формирование конечного сгустка, приходящего к зазору выходного резонатора.

Пиковая выходная мощность в такой постановке задачи (таблица 1) находится на уровне $P_{\text{out}} = (2250)^2/2 = 2,53 \text{ МВт}$. 2250 – нормированная амплитуда выходного сигнала (рис. 2). КПД клистрона при этом составляет 24,3%. Столько низкое значение эффективности по сравнению с экспериментальными значениями связано с тем, что:

1) В расчётах приходилось использовать постоянный уровень внешнего фокусирующего магнитного поля 850 Гс. В эксперименте значение индукции магнитного поля увеличивалось к выходному зазору от 850 до 1350 Гс. Поэтому при расчётах электронные сгустки были менее компактными перед торможением, что сказалось на конечной эффективности.

2) Петля ввода энергии уменьшает характеристическое (волновое) сопротивление каналов, амплитуду высокочастотных полей входного резонатора со своей стороны резонатора, вызывая различие амплитуды напряженности электрического поля основной моды в разных каналах. Электроны в каналах, расположенных со стороны коаксиального ввода мощности, хуже группируются и испытывают более слабое торможение в выходном резонаторе. В экспериментальном образце эти недостатки были устранены «вручную» путём подстройки конструкции резонатора.

3) Также на процесс торможения электронов оказывает влияние неравномерность основной моды колебаний в выходном резонаторе из-за щели связи с волноводом. На рисунке 3 показано, что в верхних каналах, по которым двигались электроны, конечная скорость электронов имеет значение около $9 \cdot 10^7$

м/с. В нижних каналах электроны, отдавшие больше энергии во время торможения, имеют уже скорости электронов порядка $5 \cdot 10^7$ м/с.



Рис. 3. Лучи электронов в выходном резонаторе

3. Сравнение результатов расчетов по трёхмерной программы с одномерной теорией

Сравним результаты расчётов трёхмерной модели и одномерной теории (DEV 5.1 [4]) по известным амплитудам ВЧ наведенного напряжения в зазорах резонаторов первой гармоники (таблица 2). Амплитуды высокочастотных наведенных полей первой гармоники, выраженные в напряжении пучка, в одномерной модели при входной мощности 40 Вт и КПД расчёта 72,9% представлены на рисунке 4. Графика программы не отображает амплитуды резонаторов второй гармоники.

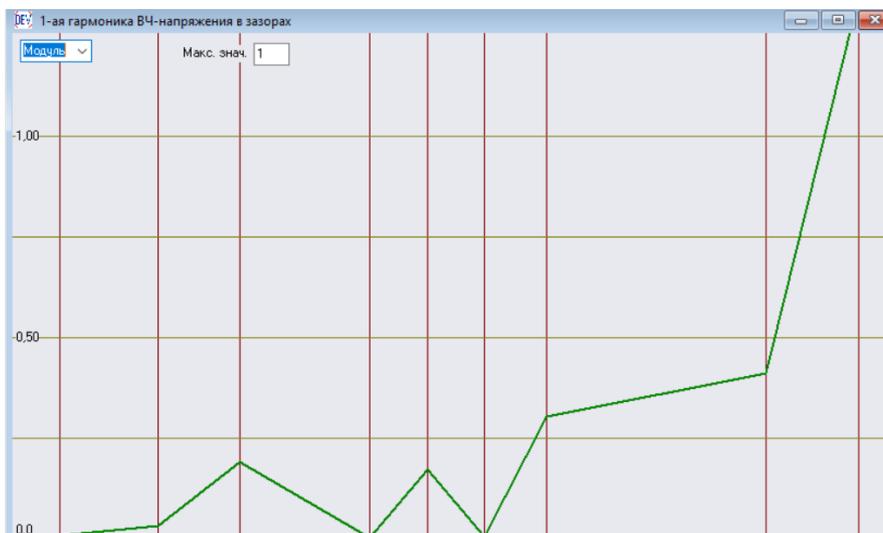


Рис. 4. Амплитуды ВЧ наведенных полей первой гармоники в одномерной модели

Таблица 2. Сравнение результатов расчётов в трёхмерной и одномерной программах

Амплитуда ВЧ поля в зазоре резонаторов (U/U_0)	Трёхмерная модель (входная мощность 30 Вт)	Одномерная теория (входная мощность 40 Вт)
5 резонатор	0,14	~0,2
7 резонатор	0,24	~0,3
8 резонатор	0,29	~0,4

Амплитуды напряженности высокочастотных электрических полей измерялись в каналах, расположенных со стороны входной петли, поэтому значения амплитуд меньше, чем было получено при оптимизации в одномерной программе DEV 5.1.

Практически при совпадающих амплитудах наведенных напряжений ключевых резонаторов клистрона наблюдается существенное отличие в выходных характеристиках (КПД 24,3% и 72,9%). Связано это прежде всего с особенностями программных комплексов и теми физическими факторами, которые не учитывают одномерные теории.

Одномерная теория не учитывает волновые процессы в сверхразмерных структурах, в частности, в кольцевых резонаторах, а также асимметрию в резонаторах, волноводах с индуктивной или ёмкостной связью, никак не учитывает изменение внешнего магнитного поля вдоль длины клистрона.

В одномерных программах торможение электронных сгустков происходит в одной фазе высокочастотного тормозящего поля выходного резонатора. В одномерной теории расчёт происходит для одного пучка, конечное значение выходной мощности сигнала определяется домножением оптимального результата в одном канале на количество лучей, например, 40-лучевой прибор с силой тока 200 А рассчитывается для одного пучка с силой тока 5 А.

В трёхмерном случае сгусток имеет конечный размер в фазовом пространстве. Часть электронов встречает более сильное возбуждающее поле, часть – более слабое. Торможение электронных сгустков, различающихся качеством группирования и приходящих к выходному резонатору, происходит в различных фазах высокочастотного поля выходного резонатора. Электроны сгустков не могут взаимодействовать с одной фазой высокочастотного поля. Сгустки всегда будут иметь какой-то пространственный размер, взаимодействовать с различными фазами высокочастотного электрического поля. Любая попытка уменьшения поперечного размера сгустка, например, увеличением внешнего магнитного поля, ведёт к увеличению его продольных размеров из-за пространственного заряда, тем самым увеличивая разброс по фазам взаимодействия с волной и уменьшая эффективность торможения. Таким образом, усиление в каждом канале многолучевого клистрона развивается по-разному, поэтому окончательный результат будет заметно отличаться от результата «домножения» в однолучевой 1D теории.

4. Распределение электрического поля в каналах входного резонатора

Рассмотрим проблему однородности электрического поля во входном резонаторе. Петля ввода входного сигнала, расположенная в индуктивной части резонатора, вносит неоднородность в распределение высокочастотного электрического и магнитного поля. Напряженность электрического поля в тех каналах резонатора, со стороны которых находится входная связь, меньше чем с противоположной стороны, тем самым образуется неравенство амплитуды напряженности электрического поля основной моды (рис. 5). Если напряженность поля меньше, то, следовательно, и интеграл от квадрата напряженности, то есть характеристическое (волновое) сопротивление каналов уменьшается, и электроны взаимодействуют с различными амплитудами СВЧ поля резонатора. Электроны в каналах, расположенных со стороны коаксиального ввода мощности, хуже группируются и испытывают более слабое торможение в выходном резонаторе. В динамическом режиме видно, что электроны, которые пролетают со стороны петли связи, получают меньшую

модуляцию по скорости, тем самым снижая качество группирования. Вопросом первостепенной важности стоит выравнивание распределения полей тех видов колебаний резонатора, на которых работает устройство.

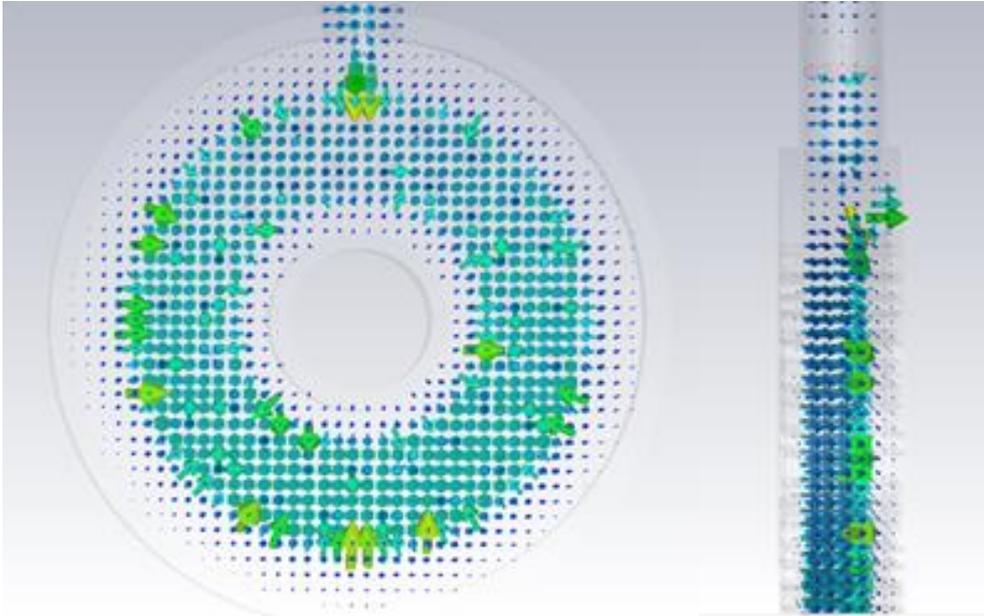


Рис. 5. Основной вид колебаний TM_{100} входного резонатора

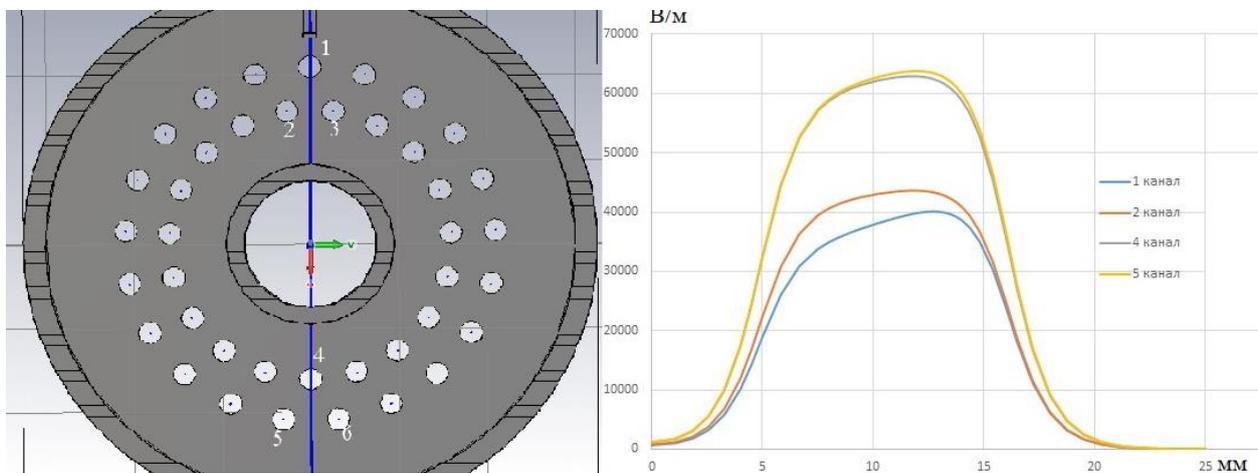


Рис. 6. Распределение амплитуды напряженности СВЧ электрического поля (В/м) в каналах входного резонатора.

На рис. 6 представлено распределение амплитуды высокочастотного электрического поля основной рабочей моды вдоль оси каналов резонатора с внесением неоднородности в виде петли связи, изображенные слева на этом же рисунке.

Заметим, что амплитуда СВЧ поля со стороны петли связи более чем в 1,5 раза ниже амплитуды с противоположной стороны. Характеристическое сопротивление ρ в канале со стороны петли связи равняется 10,5 Ом, а с противоположной стороны 27,3 Ом. Отличие характеристического сопротивления более, чем в 2,5 раза, является одной из причин столь низкого КПД в расчёте. В эксперименте характеристическое сопротивление ρ в каналах выравнивалось «вручную».

Следующим по порядку за рабочей модой TM_{100} во входном резонаторе является высший вид колебаний TM_{110} (рис. 7). Он имеет частоту 3,251 ГГц (на 8% больше, чем основной вид), симметричные поля и одинаковое характеристическое сопротивление ρ в точках максимума напряженности поля резонатора приблизительно равное 35 Ом, даже несмотря на то, что петля связи внесла неоднородность в распределение высокочастотного поля основной моды колебаний резонатора.

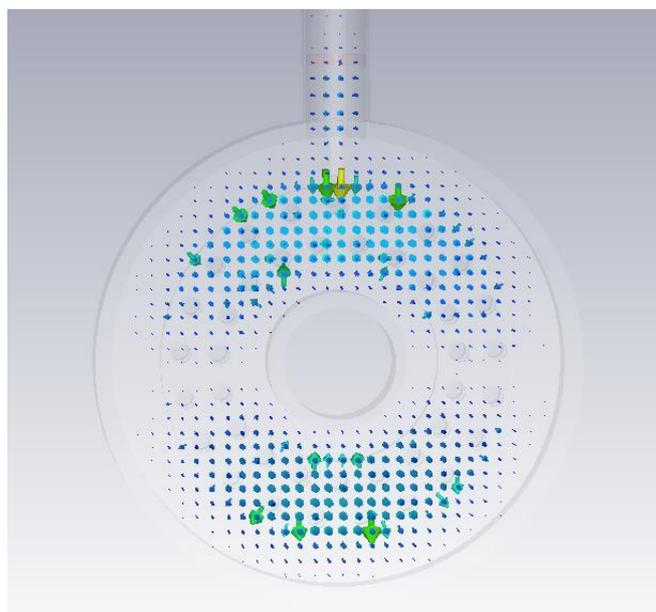


Рис. 7. Высший вид колебаний TM_{110} во входном резонаторе

В кольцевых (сверхразмерных) резонаторах высшие виды колебаний расположены в непосредственной близости к основному типу колебаний, в данном случае частота высшего вида на 8% выше основной моды. В тороидальных же резонаторах однолучевых клистронов ближайший высший

вид может иметь частоту существенно превышающую частоту основной моды колебаний.

Для получения высокой эффективности необходимо предложить способы по устранению неоднородности полей основной моды. Одним из вариантов можно рассмотреть уменьшение индуктивной области резонатора с противоположной стороны, что и было сделано в эксперименте, поскольку необходимо уменьшать характеристическое сопротивление для создания одинаковых условий группировки электронов. Также может быть предложен симметричный ввод мощности во входной резонатор.

Аналогичные проблемы высших мод колебаний возникают и в промежуточных резонаторах группирователя, и также могут сказываться на уровне результирующего КПД клистрона.

5. Заключение

Впервые проведено трёхмерное моделирование электронных процессов в мощных многолучевых приборах O – типа, вызванное необходимостью детального анализа процессов в мощных многолучевых клистронах с целью нахождения объективных физических причин ограничения КПД.

Получен первый опыт постановки задачи, определения времени расчёта, сетки разбиения, количества заряженных частиц в трёхмерных программных пакетах, поскольку до этого исследователи и разработчики использовали только одномерные и двумерные программные комплексы. Отмечены ограничения применявшегося метода расчёта.

Результаты проведенного трехмерного моделирования процессов усиления показали, что в различных каналах они проходят по-разному, распределение СВЧ поля является неравномерным, заметное влияние оказывает несимметричность устройств связи для ввода и вывода энергии, а также высшие моды колебаний в применяемых сверхразмерных резонаторах.

Результирующее значение КПД при трёхмерном анализе оказывается существенно ниже из-за невозможности увеличения фокусирующего магнитного поля вдоль длины клистрона и выравнивания характеристического

сопротивления в разных каналах входного резонатора в использованной методике расчёта. Авторы надеются в дальнейшем устранить выявленные недостатки.

Авторы выражают искреннюю признательность Игорю Анатольевичу Гузилову за полезное обсуждение результатов и сделанные замечания.

Литература

1. Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю. Импульсный 6 МВт БАК многолучевой клистрон. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017, № 7, URL <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/3/text.pdf>.
2. Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. О возможности повышения выходной мощности БАК – клистронов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017, № 10, URL <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/12/text.pdf>.
3. Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. БАК–клистроны – новое поколение клистронов в вакуумной электронике. Вестник Московского Университета. Серия 3: Физика и Астрономия. 2019, №1, С. 36-39.
4. Konnov A.V., Malykhin A.V. Frequency-domain code Dev. 5.1 for analysis of coupled cavity traveling wave tubes, klystrons and their hybrids. IVEC 2005, Noordwijk, Netherlands, pp. 195-198.

Для цитирования:

Р. В. Егоров, В. Л. Саввин. Трёхмерное моделирование процессов усиления в многолучевом клистроне. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.6.1