

Применение метода конечных элементов при изготовлении структуры линейного ускорителя электронов

О.Л. Масленников, В.В. Терентьев, И.О. Четвериков
*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия*

Введение

Для обеспечения рабочего режима в ускоряющей структуре необходимо при изготовлении контролировать частоты отдельных ячеек и коэффициенты связи между ними. Допустимое отклонение по частоте одной ячейки составляет 100 кГц при рабочей частоте 2998 МГц, что составляет менее 0.01%. Для достижения столь высокой точности изготовления по частоте необходимо проводить высокоточные радиотехнические измерения при постоянной температуре и с использованием прессы для улучшения контакта между поверхностями. После определения частоты конкретной ячейки производится расточка диаметра для понижения частоты на необходимую величину. Такой способ настройки предполагает, что первоначально имеется некоторый запас по частоте, который затем последовательно в несколько шагов уменьшается до нуля.

Еще более сложна методика настройки ускорителя по коэффициентам связи. Коэффициенты связи настраиваются попарно в составе одного каскада. Условием настройки является получение необходимого соотношения полей в ускоряющих ячейках. Соотношение полей на основном участке равно единице. Это выполняется, когда щели в каскаде имеют одинаковую длину, поэтому настройка не является особо сложной. Наибольшие проблемы возникают при работе с инжекторным участком, где перепад амплитуд может достигать отношения один к четырем. Допустимое отклонение по величине полей в соседних ускоряющих ячейках составляет порядка 2%. Эта величина гораздо ниже, чем допустимое отклонение по частоте, однако для достижения даже такой точности необходимо проводить несколько измерений и расточек щелей связи.

Таким образом, настройка ячеек линейного ускорителя электронов по частоте и коэффициентам связи является длительным и трудоемким процессом, требующим проведения радиотехнических измерений и многократных расточек. Эта процедура часто приводит к тому, что в процессе настройки качество проводящих и контактных поверхностей недопустимо ухудшается, поэтому предварительное определение размеров щелей связи и диаметров ячеек производят на специально изготавливаемом макете, что кроме затрат времени требует затрат материала.

В НИИЭФА им. Д.В. Ефремова предпринимались попытки разработать приближенные численные методы для расчета размеров щелей связи и частоты, но эти методы не учитывали некоторые параметры, влияющие на итоговое распределение полей в каскаде. Основные параметры, существенно влияющие на коэффициент связи между ячейками: длина щели связи, высоты прилегающих ячеек, форма ячеек, диаметр расположения щели связи, частота. Самый простой способ учесть все эти параметры – использовать один из уже известных трехмерных алгоритмов электродинамического анализа, такой, например, как метод конечных элементов.

Наиболее распространенными продуктами в этой области являются программные комплексы: High Frequency Structure Simulator (производитель HEWLETT PACKARD) и Maxwell (производитель ANSOFT). Отечественный программный комплекс ISFEL – 3D [1], основанный на методе конечных элементов, был разработан в СПбГЭТУ (ЛЭТИ) в сотрудничестве с НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. Он оказался наиболее удобным для решения задач, поставленных в этой статье.

Расчет собственных частот ячеек

Возможности программы ISFEL – 3D продемонстрируем на примере расчета ускорителя УЭЛР-2.5-0.5Д-0.25. Рабочая частота ускорителя 2998 МГц, выходная энергия 2.5 МэВ.

Расчет производился одновременно с изготовлением макета ускоряющей структуры. Такая процедура позволила оценить ошибки по частоте и соотношению полей, получаемые программой, сравнивая результаты расчетов с экспериментальными данными. На первом шаге настройки были изготовлены ячейки с большим запасом по частоте. Размеры задавались без предварительных расчетов. Результаты измерений и рассчитанные значения собственных частот сведены в табл. 1.

Таблица 1.

№ Ячейки	f_1 экспериментальная частота, МГц	f_2 расчетная частота, МГц	$f_1 - f_2$
T01	3247.93	3250.99	-3.04
T02	3247.33	3250.77	- 3.44
T03	3248.98	3253.8	- 4.82
T04	3166.33	3170.2	- 3.87
T05	3301.72	3309	- 7.28
T06	3156.17	3154.57	1.7
T07	3254.78	3260.64	- 5.7
T08	3191.54	3196.58	- 5.04
T09	3207.41	3212.4	- 5
T10	3217.58	3223.8	- 5.22

В последнем столбце приведена разница, показывающая несоответствие рассчитанных и измеренных значений. Эта погрешность появляется в результате ошибки, вносимой как методом конечных элементов, так и несовпадением граничных условий при расчете и эксперименте. Максимальная ошибка менее 8 МГц, т.е. погрешность расчетов не превышает 0.25%. Как видно из таблицы, первоначальный запас по частоте при изготовлении ячеек составляет от 150 до 300 МГц, что соответствует припуску на диаметр ячейки 4–8 мм. Таким образом, предварительно рассчитывая частоты программой ISFEL – 3D, можно более чем в 40 раз уменьшить припуски.

Расчет элементов связи

Основным критерием определения длины щели является соотношение полей в ускоряющих ячейках. Оно задается при расчете динамики пучка так, чтобы обеспечить, как фокусировку пучка, так и максимальный захват. Вторым условием, особенно важным в случае ускорителя с большим током, является необходимость в относительно больших коэффициентах связи. Для определения длин щелей необходимо считать целиком каскад. Полученные результаты расчета инжекторной части ускорителя, состоящей из четырех каскадов, приведены вместе с данными измерений в табл. 2.

Таблица 2.

		1 каскад	2 каскад	3 каскад	4 каскад
Частота $\pi/2$ вида колебаний, МГц	Расчетная	2997.5	2997.6	2997.7	2997.6
	Эксперим.	2997.47	2997.46	2997.45	2997.69
Соотношение амплитуд полей в ускоряющих ячейках	Расчетные	1.53	3.14	2.78	2.26
	Эксперим.	1.49	3.06	2.89	2.25
Ошибка по соотношению амплитуд %		2.61	2.55	3.80	0.44

Из данных, приведенных в табл. 3, можно оценить точность расчета размеров щелей. Ошибке в соотношении полей на 4 % соответствует изменение углового размера щели в данном случае на величину в среднем $20'$. При столь незначительном расхождении вместо расточки щели можно ограничиться снятием большей фаски. Диаметры ячеек при расчете, представленном в табл. 2, были подогнаны таким образом, чтобы частоты $\pi/2$ вида колебаний совпали с частотами, полученными экспериментально. Размеры содержатся в табл. 3.

Таблица 3.

№ Ячейки	2В Диаметр ячейки, мм расчетный	2В Диаметр ячейки, мм экспериментальный	ΔB , мм
T01	76.18	76.051	0.129
T02	75.50	75.402	0.098
T03	75.38	75.314	0.066
T04	75.14	75.106	0.034
T05	76.18	76.147	0.033
T06	74.80	74.762	0.038
T07	76.06	75.941	0.119
T08	75.76	75.608	0.152
T09	75.88	75.732	0.148

Заключение

Сравнивая результаты табл. 1 и 3, можно сделать вывод о том, что программа ISFEL – 3D на частоте 2998 МГц позволяет определять диаметры с точностью 0.2 мм. При расчете собственных частот отдельных ячеек и целого каскада точность получается примерно одинаковая. Однако следует отметить, что ошибки, получаемые в этих двух случаях, имеют противоположные знаки; учет этого обстоятельства позволит получать более точные результаты.

Разница между размером щели связи, полученным экспериментально и рассчитанным, составляет 20'. Допуск на изготовление щели связи составляет 5', как в измерения, так и в расчет включаются две щели. Отсюда можно сделать вывод, что расчет длины щелей связи выполняется с точностью, близкой к допускам на изготовление.

Время расчета отдельной ячейки на персональном компьютере с тактовой частотой 500 МГц составляет 15 минут, а одного каскада – от 40 минут до 2 часов в зависимости от скорости сходимости решения.

Список литературы

1. С.А. Силаев. Разработка методов моделирования электромагнитных полей и устройств и их применение для анализа электровакуумных приборов. С-Петербург, 1997.