# Моделирование импедансов связи вч резонаторов

Наиболее популярным инструментом для моделирования импедансов связи элементов структуры кольцевых ускорителей является программа CST Studio [1]. Для этой задачи в программе используется блок к Wakefield Solver. Блок рассчитывает электромагнитные поля, генерируемые сгустком заряженных частиц в элементах структуры используя время в качестве независимой переменной. Импедансы рассчитываются путем FFT преобразования полученных полей.

Для получения правильного результата FFT преобразования требуется, чтобы поля в элементе рассчитывались на протяжении времени после прохождения сгустка частиц, достаточного для полного затухания наведенного поля. В Wakefield Solver это время задается установкой значения параметра WL, который определяет максимальное расстояние, на которое удаляется сгусток после прохождения исследуемого элемента. Вне зависимости от потерь вч мощности в стенках резонатора максимальное значение добротности резонанса, которое может быть получено в результате моделирования, равняется [2]

  (1)

где *fr*- частота резонанса и Δ*fmin*= *c*/WL, *с* - скорость света в вакууме. Из этого простого соотношения следует, что в случае моделирования высокодобротных элементов параметр WL должен иметь очень большое значение, что приводит к увеличению времени счета до неприемлемых размеров.

Это иллюстрируется ниже результатами моделирования продольного импеданса для некоторого модельного резонатора, показанного на рисунке 1 и который является сильно упрощенным вариантом резонаторов ВЧ-2 и ВЧ-3 коллайдера НИКА.



Рисунок . Тестовая модель резонатора для CST Studio.

Моделирование проводилось для идеально проводящего материала резонатора для нескольких значение параметра WL На рисунке 2 приведен действительная часть импеданса на частоте 94.7 МГц. Существенно, что частота резонанса не зависит от значения параметра. Поскольку частота резонанса значительно ниже критической частоты камеры, в которой распространяется пучок, потери вч мощности отсутствовали и, следовательно, добротность должна стремиться к дельта-функции. Очевидно, что для приближения к этому результату значение параметра WLдолжно стремиться к бесконечности. Существенно, что частота резонанса не зависит от

Поскольку проводимость материала реального резонатора имеет конечное значение, и импеданс и добротность должны иметь конечные значения, которые должны достигаться при конечном значении WL Однако, для меди с удельной проводимостью ***σ*** = 5,8⋅107 См/м зависимость результатов от WL очень мало отличается от приведенной на рисунке 2. На рисунке 3 показан вэйк-потенциал при WL=100 м. Видно, что при данном значении WL затухание весьма незначительно и для получения точных данных об импедансах реального резонатора необходимо значительно увеличивать значение параметра.



Рисунок . Продольный импеданс тестовой модели, полученный для нескольких значений WL.



Рисунок . Вэйк-потенциал рассчитанный для ***σ*** = 5,8⋅107 См/м и WL = 100м.

Эту трудность можно обойти, если увеличить затухание вэйк-потенциала, что легко можно обеспечить изменив при моделировании величину удельной проводимости материала резонатора. Если резонатор заполнен диэлектриком без потерь, а магнитная проницаемость материала стенок резонатора μ = 1, то потери вч мощности *P* в стенках резонатора определяется как [3]

 

а накопленная энергия

 

В этих выражениях H и Ht - напряженность магнитного поля в объеме резонатора и его тангенциальная составляющая у стенок соответственно, μ0 - магнитная постоянная, V объем резонатора, S - площадь поверхности резонатора. Для двух одинаковых резонаторов, отличающихся только проводимостью материала стенок, отношения добротностей и продольных импедансов равны

  (2)

На рисунке 4 показан вэйк-потенциал, рассчитанный для ***σ*** = 5,8⋅102 См/м WL = 100 м. То есть для данного значения параметра WL необходимое затухание поля для получения корректных результатов FFT может быть обеспечено при снижении проводимости материала резонатора при моделировании в Wakefield Solver должно быть снижено в 105 раз.



Рисунок . Вэйк-потенциал рассчитанный для ***σ*** = 5,8⋅102 См/м и WL = 100м.

На рисунке 5 показана зависимость рассчитанного по соотношению () продольный импеданс модельного резонатора. Видно, что "реальный" импеданс выходит на близкие к насыщению значения при отношении проводимостей ***σreal*** ***/σsim>*** 105. Рассчитанная таким же образом "реальная" добротность показана на рисунке 6.



Рисунок . Продольный импеданс тестового резонатора в зависимости от значения ***σ***, использованного при моделировании.



Рисунок . Добротность тестового резонатора в зависимости от значения ***σ***, использованного при моделировании.

Приведенные на рисунках данные получены при значении WL = 100 м. Это значение параметра выбрано исключительно из соображения обеспечения приемлемого времени счета тестовой задачи. Разумеется, для реальных задач значения параметра может выбираться и иным для обеспечения требуемой точности результата моделирования.

## Заключение

## Литература

1. 1. http://www.cst.com
2. С. Zanini, Electromagnatic Simulation of CERN Accelerator Components and Experimental Applications, CERN-THESIS-2013-076
3. Линейные ускорители ионов, под ред. Б.П. Мурина, т.2, Атомиздат, 1978