

РАСЧЕТНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ЧАСТОТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ВЧ ГЕНЕРАТОРА УСКОРИТЕЛЯ БЕТА-8

А. Н. Шейн, А. В. Тельнов, М. Л. Сметанин, Л. Е. Поляков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлен способ трехмерного электродинамического моделирования индикаторной петли – датчика, работающего в цепи частотной обратной связи питающего ВЧ генератора электронного ускорителя БЕТА-8 [1]. ВЧ генератор в процессе эксплуатации должен оперативно подстраиваться в резонанс с высокочастотным (добротность ≈ 48000) ускоряющим коаксиальным резонатором, рабочая частота которого $\approx 99,9$ МГц. Уходы частоты могут быть вызваны как изменением геометрии ускоряющего резонатора в зависимости от температуры его стенок, рабочего вакуума в его внутренней полости, так и ряда других возможных причин. Возможность подстройки частоты реализована по косвенному измерению коэффициента стоячей волны (КСВН) в месте возникновения локальных минимумов напряженности электрического поля (максимумах напряженности магнитного поля) в передающем фидере при частотной расстройке системы. Проведено моделирование и расчет собственно магнитной индикаторной петли, расположенной на корпусе передающего коаксиального ВЧ фидера. При этом выбрана ее оптимальная геометрия (эффективная площадь петли), обеспечивающая сигнальное электрическое напряжение с амплитудой 5–10 В (в случае стоячей волны при передаваемой средней мощности 180 кВт). Такой сигнал достаточен для функционирования обратной связи ВЧ генератора. Рассмотрено влияние электрического экрана, устанавливаемого на данную петлю для улучшения качества регистрируемого сигнала. Реализована расчетная модель передающей линии – коаксиального фидера (с установленной проектируемой петлей), нагруженного на резонансный контур – модель ускоряющего коаксиального резонатора. На финальном этапе создана полная расчетная модель ВЧ резонансной системы ускорителя БЕТА-8, для которой смоделированы как рабочий режим с оптимальной связью с ускоряющим резонатором на рабочей частоте, так и режим рассогласования, возникающий при частотной расстройке системы. Для каждого из режимов проведена расчетная калибровка разрабатываемого датчика.

Введение

Разработка резонансного электронного ускорителя БЕТА-8 осуществляется в РФЯЦ-ВНИИЭФ на протяжении ряда последних лет [1, 2]. Создание ускорительной установки со средней мощностью элект-

ронного пучка до 300 кВт с дискретным диапазоном регулировки энергий ускоренных электронов – от 1,5 до 7,5 МэВ, предназначенного для проведения радиационных исследований разрушения или модификации конструкционных материалов, основано на требованиях, обоснованных ранее [1, 3].

При включении ВЧ генератора – источника питания резонансного электронного ускорителя БЕТА-8 на ускоряющий коаксиальный резонатор требуется введение в действие двух цепей обратной связи генератора с резонатором. Первая цепь – частотной обратной связи, позволяет подстраивать рабочую частоту ВЧ генератора под резонансную частоту коаксиального ускоряющего резонатора (ускоряющий резонатор – высокочастотная система, требующая для работы ВЧ питание с высокой стабильностью). Основным элементом данной цепи является индикаторная петля магнитной связи, устанавливаемая в передающем фидере, связывающем ВЧ генератор и узел ввода ВЧ мощности (УВМ), в месте возникновения узла напряжения при возможном рассогласовании. Рассогласованный режим передачи в ВЧ фидере может установиться при отклонении резонансной частоты передаваемого ВЧ сигнала от рабочего значения. При этом на петле наводится напряжение, которое будет зафиксировано системой управления ВЧ генератора. Генератор в этом случае автоматически начнет перестраивать несущую частоту до тех пор, пока на петле не перестанет наводиться напряжение. Его отсутствие будет говорить о том, что система настроена в резонанс с ускоряющим резонатором.

Ниже представлен способ трехмерного электродинамического моделирования индикаторной петли – датчика, работающего в цепи частотной обратной связи питающего ВЧ генератора электронного ускорителя БЕТА-8.

Расчетная модель датчика и определение оптимальных геометрических параметров петли

В качестве ВЧ фидера, способного передавать сигнал в рабочем диапазоне системы ВЧ питания ускорителя БЕТА-8 (от 98 до 102 МГц), со средней мощностью до 180 кВт, используется коаксиальная линия воздушного заполнения. Волновое сопротивление линии – 50 Ом, внутренний диаметр внешнего проводника – 160 мм, внешний диаметр внутреннего проводника – 70 мм, материал проводников – медь. Данная линия способна обеспечивать как штатный

режим передачи ВЧ мощности (режим бегущей волны), так и в случае рассогласования и возникновения отражений от нагрузки способна выдерживать режим перенапряжения (режим стоячей волны).

Линия передачи связывает ВЧ генератор с УВМ, расположенным на верхней торцевой стенке ускоряющего коаксиального резонатора. Положение мест подключения линии к генератору с одной стороны и УВМ с другой определяет сложную трехмерную геометрию ВЧ фидера – перепад высот ≈ 2 м, горизонтальное расстояние между точками подключения $\approx 1,5-2$ м. На сегодняшний день конструкция такой линии передачи разработана, изготовлена и успешно испытана [2].

Для обеспечения функционирования ВЧ генератора требуется установить в линию передачи датчик, способный фиксировать возможное появление режима стоячей волны в фидере. Такой датчик используется в частотной обратной цепи связи с ВЧ генератором и должен обеспечивать наведение напряжения на своих зажимах в пределах от 5 до 10 Вв режиме рассогласования при передаче максимальной ВЧ мощности 180 кВт на рабочей частоте ускорителя – 99,9 МГц. Такие требования определены системой автоматического управления ВЧ генератора.

Датчик проектируется на основе петли связи с магнитным полем в фидере. Его место установки определяется нахождением узла напряженности электрического поля (максимумом напряженности магнитного поля) при возникновении стоячей волны в режиме рассогласования.

На первом этапе проектирования методом численного трехмерного моделирования решалась электродинамическая задача для модели, состоящей из прямолинейного отрезка коаксиального волновода (160/70мм) длиной 3 м с резистивной нагрузкой, величина которой изменялась в пределах 50–10000 Ом. Расчет проводился исходя из того, что на вход линии подается ВЧ сигнал с частотой 100 МГц и средней мощностью 180 кВт. Путем варьирования сопротивления нагрузки изменялся режим работы линии от согласованного до режима холостого хода. В поперечном сечении линии, соответствующем месту возникновения узла напряженности электрического поля (в режиме холостого хода), на внешнем проводнике вводилась модель измерительной петли (рис. 1).

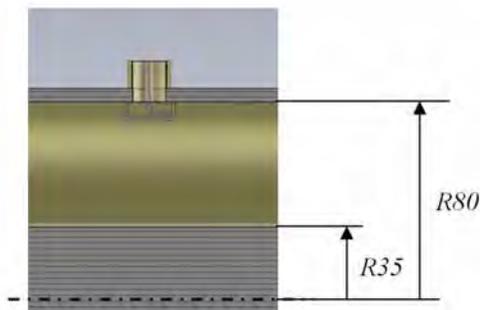


Рис. 1. Фрагмент места расположения петли магнитной связи в передающем фидере

Индикаторная петля магнитной связи спроектирована на основе соединительного разъема СР-50-165ФВ и петли из полосы меди толщиной 1 мм и шириной 6 мм. Петля имеет дополнительный экран от возможных наводок со стороны электрического поля (рис. 2).

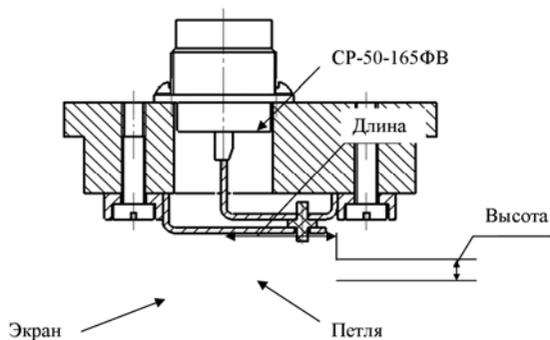


Рис. 2. Индикаторная петля магнитной связи

Величина напряжения, наводимого на петле, определяется ее площадью (произведением высоты и длины петли). Путем изменения площади петли исследовано изменение уровня напряжения на выходе датчика при установлении режима стоячей волны в линии. Площадь измерительной петли последовательно уменьшалась с изменением ее высоты и ширины в пределах от 125 до 30 мм² (см. таблицу). Напряжение сигнала определялось после нахождения коэффициента передачи по напряжению между выходом датчика и вводом ВЧ мощности.

Требуемое значение наводимого на петле напряжения сигнала достигается при площади петли – 30–50 мм².

Расчетная зависимость напряжения на петле от ее размеров и площади

Длина петли, мм	Высота петли, мм	Площадь петли, мм ²	Напряжение на петле, В
25	5	125	21,70
20	5	100	17,55
15	5	75	13,46
10	7	70	12,65
10	5	50	9,48
10	3	30	6,53

Исследование влияния и целесообразности установки экрана осуществлялось при изменении длины петли с экраном и без него и сравнении напряжений на выходе датчика (рис. 3).

Как видно из рисунка, экран тем сильнее повышает уровень сигнала, чем больше длина петли. Это обусловлено тем, что экранируются наводки от электрической компоненты волны в волноводе, влияние которых усиливается с увеличением длины петли датчика. Для рассматриваемой модели экран не является необходимым, так как дает увеличение сигнала на $\sim 0,5$ В ($\approx 5\%$).

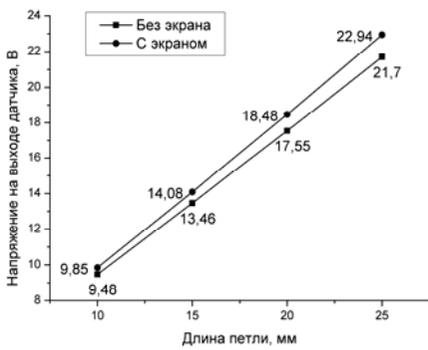


Рис. 3. Изменение амплитуды сигнала на выходе датчика в зависимости от длины петли с экраном и без

Расчетное нахождение местоположения индикаторной петли–датчика, в передающем ВЧ фидере

В силу того, что геометрия передающего фидера имеет сложную форму, нахождение места расположения индикаторной петли – узла напряженности электрического поля стоячей волны, представляет собой определенную трудность. Задачу осложняет то, что линия нагружена на высокочастотный ускоряющий резонатор с УВМ.

Решение задачи проводилось с использованием численных трехмерных электродинамических расчетов системы, состоящей из передающего фидера, УВМ и ускоряющего резонатора (рис. 4). УВМ обеспечивает согласование ВЧ системы в режиме так называемого «нулевого тока» пучка, когда вся передаваемая мощность ВЧ сигнала трансформируется в мощность потерь в стенках резонатора.

На рис. 6,а представлено распределение электрической напряженности в передающем фидере в случае согласования (частота 99,9351 МГц). Случай рассогласования с возникновением стоячей волны иллюстрирует рис. 6,б, на котором отображено распределение электрической напряженности в передающем фидере на частоте 100,05 МГц. Первый узел напряжения возникает на расстоянии в 618 мм от начала отсчета на линии проецирования, совпадающей с осью центрального проводника фидера (рис. 4). Начало отсчета соответствует месту под-

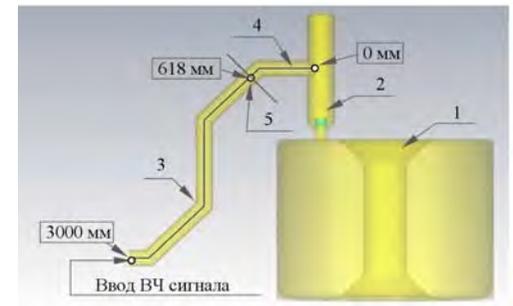
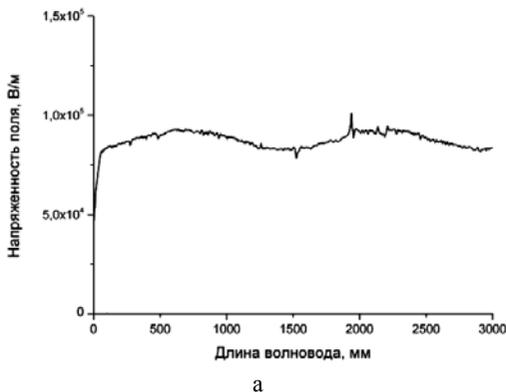


Рис. 4. Расчетная модель резонансной ускоряющей системы: 1 – ускоряющий резонатор; 2 – УВМ; 3 – передающий фидер; 4 – линия проецирования; 5 – сечение для установки индикаторной петли

На рис. 5 приведена расчетная зависимость КСВН на входе резонансной ускоряющей системы. На частоте 99,9351 МГц КСВН = 1,11 – это режим согласования, при котором в передающем фидере устанавливается режим бегущей волны. ВЧ сигнал практически без потери мощности передается в резонатор.

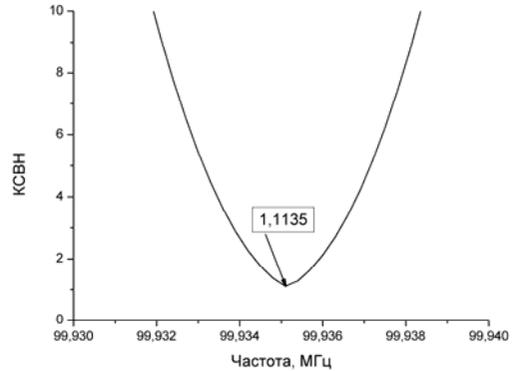


Рис. 5. Расчетное значение КСВН на входе резонансной ускоряющей системы

Таким образом, определено место, где возможно установить индикаторную петлю–датчик частотной цепи обратной связи ВЧ генератора.

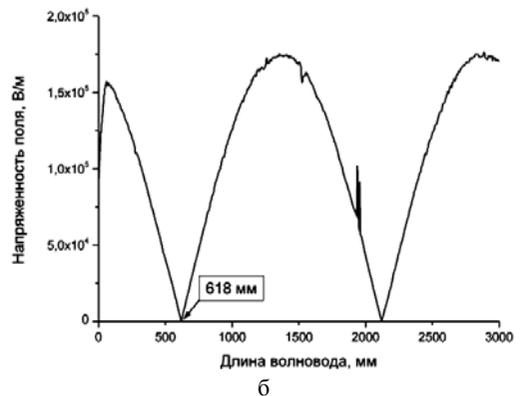


Рис. 6. Расчетные зависимости напряженности электрического поля вдоль оси передающего волновода: а – при согласовании, б – при рассогласовании

В дальнейшем в расчеты была включена полученная ранее модель датчика с выбранными геометрическими размерами петли. Датчик был установлен в найденное местоположение минимума электрической компоненты ВЧ поля полной расчетной модели ВЧ системы. В результате была получена следующая зависимость величины амплитуды напряжения на измерительной петле от частоты, которая представлена на рис. 7.

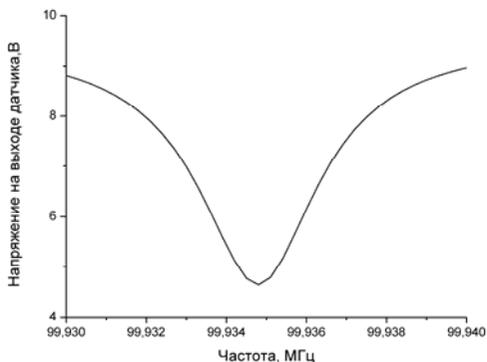


Рис. 7. Зависимость напряжения на измерительной петле от частоты (мощность ВЧ сигнала 180 кВт)

При согласовании с резонатором на частоте 99,9351 МГц величина амплитуды напряжения на петле составляет 4,7 В. При уходе частоты от резонансной (например – 99,94 МГц) значение амплитуды напряжения увеличивается до 9,0 В.

Экспериментальное определение места расположения петли-датчика в передающем ВЧ фидере

Положение минимума электрической напряженности ВЧ поля стоячей волны в передающем фидере было определено экспериментально. При его нахо-

ждении использовались результаты расчетов, представленные выше. На фидере было отмерено расстояние соответствующее 618 мм по линии проецирования от места подключения фидера к УВМ. В измерениях использовался векторный анализатор цепей Agilent E5071C. В процессе работы проводились измерения коэффициента передачи по напряжению в режиме четырехполосника. Система, состоящая из передающего фидера УВМ и ускоряющего резонатора, запитывалась от одного из портов анализатора цепей, а на его второй порт заводился сигнал с зонда, вводимого в волновод в предполагаемом месте установки разрабатываемого измерительного датчика.

Ниже, на рис. 8, приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) измеряемого коэффициента передачи. Необходимо отметить, что измерения проводились с системой, в которой ускоряющий резонатор, в силу обстоятельств, находился в развакуумированном состоянии, что обуславливает некоторое изменение его геометрии, а как следствие небольшой уход резонансной частоты от рабочего значения (99,9351 МГц [2]) к более низкой частоте 99,817 МГц. На рис. 9 показана фазо-частотная характеристика ФЧХ измеряемого коэффициента передачи.

По АЧХ видно, что наибольший коэффициент передачи соответствует резонансной частоте 99,817 МГц. Отклонение частоты от резонанса соответствует установлению в линии режима стоячей волны, и, как следствие, возникновению в месте измерения узла электрической напряженности, и уменьшению коэффициента передачи. Симметричность этой характеристики относительно резонансной частоты, а также вид ФЧХ, позволяют говорить о правильности проведенных расчетов и выбора места расположения петли-датчика.

В дальнейшем, в найденное место ВЧ передающего фидера будет установлена петля-датчик.

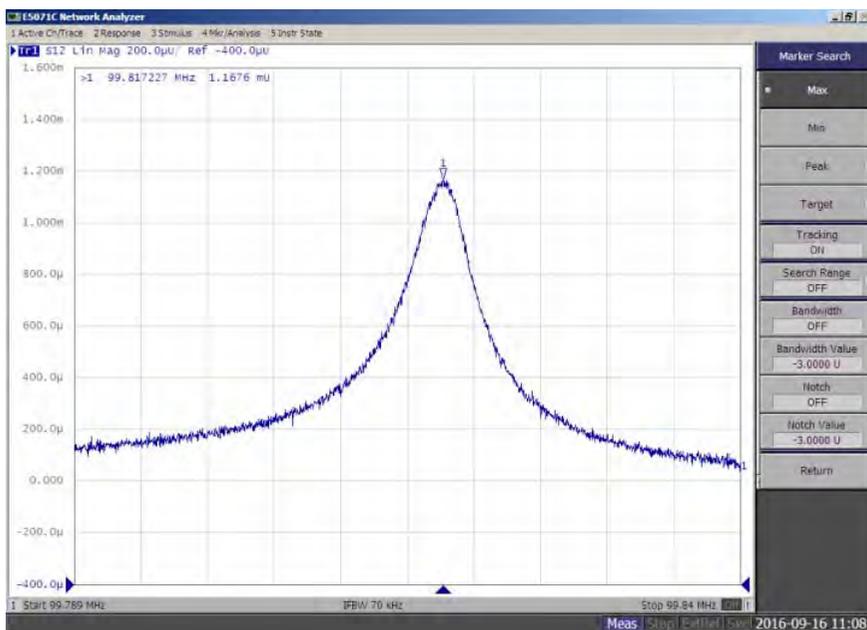


Рис. 8. Изображение АЧХ измеряемого коэффициента передачи

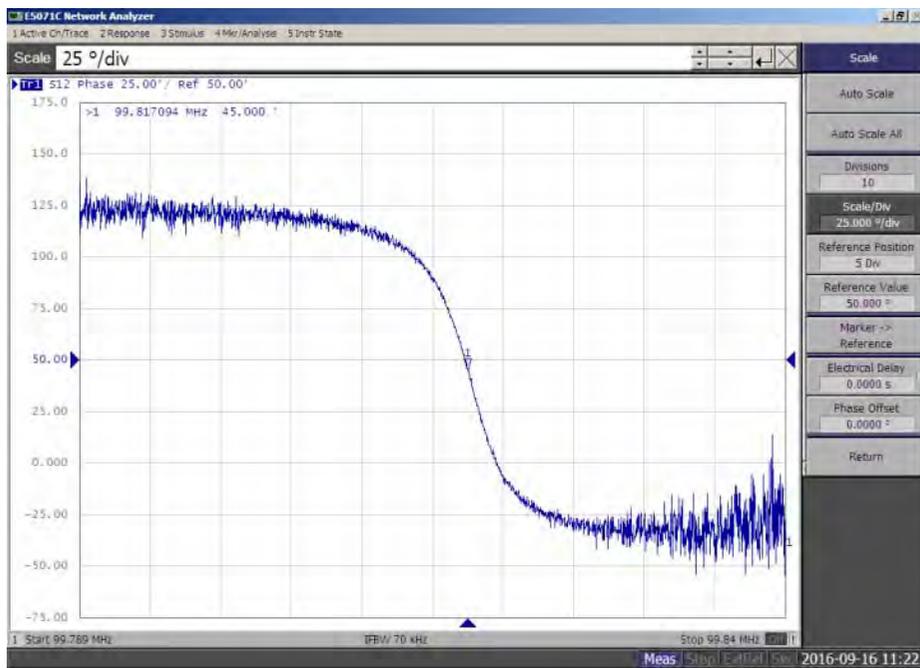


Рис. 9. Изображение ФЧХ измеряемого коэффициента передачи

Заключение

В результате выполненных исследований разработана измерительная петля-датчик частотной цепи обратной связи ВЧ генератора – источника питания резонансного ускорителя электронов БЕТА-8.

Расчетным способом установлена оптимальная геометрия петли связи (высота – 5 мм, длина – 10 мм), обеспечивающая при работе уровень напряжения (5–10 В), требуемый для функционирования системы управления ВЧ генератора.

Рассмотрено влияние электрического экрана, устанавливаемого на данную петлю для улучшения качества регистрируемого сигнала. При выбранных геометрических параметрах петли связи экран позволяет повысить амплитуду выходного сигнала датчика на ~5 %.

Реализована расчетная модель передающей линии – коаксиального фидера (с установленной проектируемой петлей), нагруженного на резонансный контур – модель ускоряющего коаксиального резонатора. При этом рассчитаны как рабочий режим с оптимальной связью с ускоряющим резонатором на резонансной частоте 99,9351 МГц, так и режим рассогласования на частоте 100,05 МГц. В результате расчетным образом найдено место расположения индикаторной петли в передающем фидере, что существенно облегчило экспериментальное определение положения узлов напряжения в линии в случае рассогласования. Найденное таким образом месторасположение петли с удовлетворительной точностью совпало с экспериментально установленным местом.

Полученные результаты испытаний и результаты трехмерного компьютерного моделирования позволяют реализовать цепь частотной обратной связи ВЧ генератора для его согласования с ускоряющим резонатором.

Литература

1. Железов С. А., Завьялов Н. В., Назаренко С. Т., Порхаев В. В., Пунин В.Т., Путевской С. А., Сметанин М. Л., Тельнов А. В. Проект электронного резонансного ускорителя непрерывного действия // VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Сборник докладов. 2006.– Саров – С. 122–128.
2. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н., Придчин С. М., Путевской С. А., Селин И. С., Ситников Н. П., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Тресков С. М., Шориков И. В., Юрлов В. Е. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 20, Ч. 1. 2015. – Саров – С. 184–193.
3. Zavyalov N. V., Zhelezov S. A., Nazarenko S. T., Porkhaev V. V., Punin V. T., Putevskoy S. A., Smetanin M. L., Telnov A. V. ACW Electron Accelerator. The Planned Design and Electrophysical Characteristics // Problems of Atomic Science and Technology. 2006, № 2, Series: Nuclear Physics Investigations (46). – P. 8–10.