

РАСЧЕТНАЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ВЧ СТРУКТУРЫ УСКОРИТЕЛЯ БЕТА-8

COMPUTATIONAL RADIO ENGINEERING TUNING OF BETA-8 LINEAR ACCELERATOR'S HF STRUCTURE

М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов, И. В. Шориков
M. L. Smetanin, A. V. Telnov, I. V. Shorikov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

В работе изложены основные подходы и методы трехмерного компьютерного моделирования составных элементов системы ВЧ питания разрабатываемого резонансного электронного ускорителя БЕТА-8. Представлен способ расчета и согласования индуктивного узла ввода ВЧ мощности (УВМ) в ускоряющий коаксиальный резонатор. УВМ рассчитан на передачу непрерывного ВЧ сигнала с частотой 100 МГц и уровнем мощности 600 кВт. Показана возможность нахождения в передающем фидере местоположения индикаторной петли – датчика, работающего в цепи частотной обратной связи питающего ВЧ генератора. Изложен метод калибровочного расчета измерительной индуктивной петли – составной части цепи амплитудной обратной связи ВЧ генератора. Приведен расчет конструкции сдвоенной согласованной нагрузки, необходимой для первоначальной отработки режимов функционирования полной системы ВЧ питания и технологических систем ускорительного комплекса.

The paper presents the basic approaches and methods of three-dimension computer modeling of component elements of developed resonance electron accelerator BETA-8 HF power system. Presented is a method for calculation and conditioning of an induction unit of HF power input (UPI) for an accelerating coaxial resonator. UPI is designed for transmission of a continuous 100 MHz, 600 kW HF signal. Demonstrated is a possibility for presence of an indicator loop placement. This indicator loop is mounted in the feeder, and is operated in the frequency feedback circuit of a HF generator. Reported is a method of calibration calculation of a measuring inductance loop – a circuit component part of HF generator's amplitude feedback. Presented is calculation of a dual conditioned load design, required for preliminary development of operation modes of total HF power system and technological systems of the accelerating complex.

1. Введение

Разработка резонансного электронного ускорителя БЕТА-8 осуществляется в РФЯЦ-ВНИИЭФ на протяжении ряда последних лет [1, 2]. Создание ускорительной установки со средней мощностью электронного пучка до 300 кВт с широким диапазоном регулировки энергий ускоренных электронов – от 1 до 8 МэВ, и предназначенного для проведения радиационных исследований разрушения или модификации конструкционных материалов основано на требованиях, обоснованных ранее [1, 3].

Ниже представлены способы трехмерного электродинамического расчета основных компонентов ВЧ структуры ускорителя и расчетные методы ее радиотехнической настройки.

2. Способ расчета и согласования УВМ с ускоряющим резонатором

Коаксиальный резонатор, передающий фидер и УВМ являются основными элементами ВЧ структуры ускорителя БЕТА-8.

Распределение электрического поля внутри резонатора, в области ускорения электронов представлено на рис. 1.

Основными габаритными размерами резонатора являются: 1) радиус внутреннего проводника – 210 мм, 2) радиус внешнего проводника – 1040 мм, 3) высота резонатора (продольный размер) – 1626 мм. Ускорение электронов осуществляется в серединной поперечной плоскости резонатора. К основным расчетным электродинамическим характеристикам (ЭДХ) коаксиального

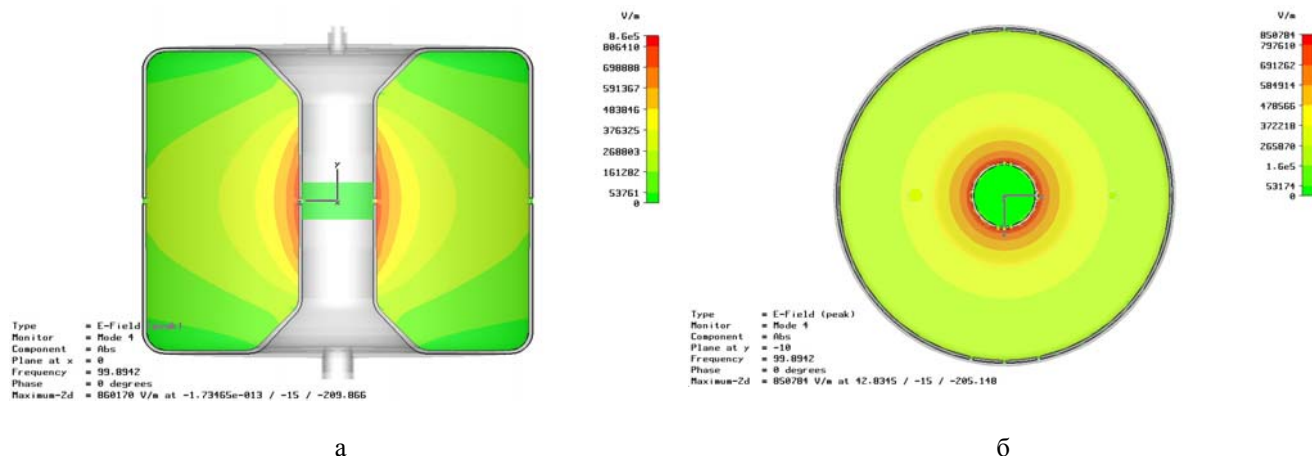


Рис. 1. Эпюры напряженностей электрического поля в различных плоскостях коаксиального резонатора: а – срединная продольная плоскость; б – срединная поперечная плоскость

резонатора относится: собственная резонансная частота $f_0 = 99,9$ МГц; приращение кинетической энергии за проход $We = 1,5$ МэВ; фактор времени пролета $T = 0,777$; мощность потерь в стенках резонатора $P_{пот} = 165,2$ кВт; добротность резонатора $Q_0 = 56088$; шунтовое сопротивление $Z_{sh} = 25,25$ МОм.

Для питания резонатора будет использован ВЧ генератор, который на резонансной частоте 100 МГц, выдает на согласованную нагрузку сигнал со средней мощностью до 600 кВт.

УВМ предназначен для работы в качестве устройства, позволяющего связывать питающий ВЧ генератор с ускоряющим коаксиальным резонатором.

В качестве основных входных технических требований, предъявляемых к УВМ, можно отметить следующее: связь с резонатором – индуктивная; вход устройства – коаксиальный, с волновым сопротивлением 50 Ом; размеры входного коаксиального фидера воздушного заполнения – $\varnothing 160/70$ мм; УВМ должен работать на любой частоте в диапазоне 98 – 102 МГц; рабочая частота – 100 МГц; проходящая ВЧ мощность в режиме импульсной и непрерывной генерации – до 600 кВт; УВМ должен обеспечить уровень согласования с коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) $\leq 1,2$ подводящего фидера с резонатором в диапазоне частот 98–102 МГц.

Характеристики ускоряющего резонатора, необходимые для расчета УВМ: шунтовое сопротивление с учетом мощности пучка

$$R_{\Sigma} = R_{уск} \frac{P_{пот}}{P_{\Sigma}} = 6,95 \text{ МОм}; (R_{уск} = Z_{sh}, \text{ полная по-}$$

требляемая мощность (с пучком): $P_{\Sigma} = 600 \text{ кВт}$), добротность с учетом мощности пучка $Q_{\Sigma} = Q_0 \frac{P_{пот}}{P_{\Sigma}} = 15400$.

Основным элементом УВМ является индуктивная петля, необходимая для магнитной связи передающего фидера с резонатором. Петля устанавливается на торцевой стенке резонатора в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля. На рис. 2 показано место установки петли в резонаторе.

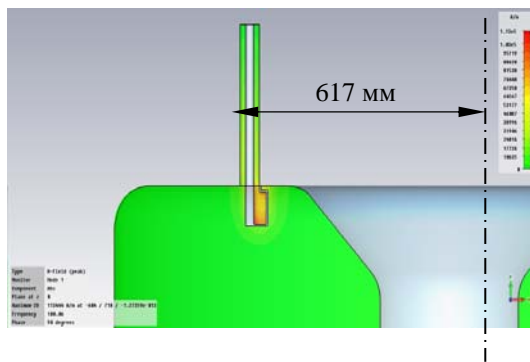


Рис. 2. Место установки петли в резонаторе

Для согласования входного импеданса резонатора с волновым сопротивлением передающего фидера выбрана схема с четвертьволновым трансформатором и параллельным короткозамкнутым шлейфом. На рис. 3 представлена эквивалентная схема УВМ.

На эквивалентной схеме резонатор представлен параллельным LRC контуром в сечении 1–1, а элемент связи (индуктивная петля) представлен идеальным трансформатором с коэффициентом трансформации напряжения $m = U_{1-1} / U_{2-2}$.

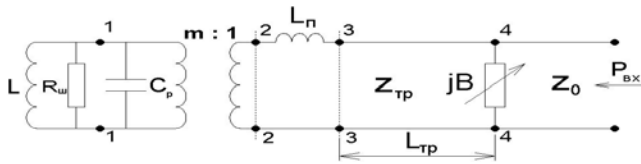


Рис. 3. Эквивалентная схема узла ввода мощности

К петле между сечениями 3-3 и 4-4 присоединен трансформирующий отрезок линии длины $L_{TP} \approx \lambda_0/4$. К этому отрезку в сечении 4-4 подключен генераторный конец фидера и параллельная регулируемая реактивная проводимость jB , необходимая для компенсации реактивной проводимости в сечении 4-4 и достижения условия согласования $1/Y_{4-4} = Z_0 = 50 \text{ Ом}$. Проводимость jB реализуется в виде короткозамкнутого шлейфа переменной длины, включенного параллельно в линию.

Ввод мощности должен быть настроен так, чтобы коэффициент отражения в его входном сечении 4-4 на рабочей частоте был равен нулю: $\Gamma_{4-4}(\omega_0) = 0$.

Входное сопротивление резонатора в сечении 3-3 на рабочей частоте:

$$Z_{3-3} = \frac{R_w}{m^2} + j\omega_0 L_n = R_{2-2} + jX_L,$$

где $R_{2-2} = R_w/m^2$ – активная часть входного сопротивления резонатора, $X_L = \omega_0 L_n$ – индуктивное сопротивление петли связи.

Входная проводимость УВМ с учетом свойств четвертьволнового трансформатора:

$$Y_{4-4} = R_{2-2}/Z_{TP}^2 + (jX_L/Z_{TP}^2 + jB).$$

При условии компенсации реактивности слагаемое в скобках равно нулю. Тогда входное сопротивление УВМ при согласовании будет равно:

$$Z_{4-4} = Z_{TP}^2 / R_{2-2} = Z_0$$

Входной фидер: волновое сопротивление $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ (коаксиальная линия с поперечным сечением 160/70мм). Согласующий трансформатор: $Z_{TP} \approx 30 \text{ Ом}$, $L_{TP} \approx \lambda_0/4$.

Для обеспечения согласования необходимо выполнение следующих условий: активная часть входного сопротивления резонатора: $R_{2-2} = Z_{TP}^2 / Z_0 \approx 18 \text{ Ом}$, коэффициент связи петли с резонатором: $\beta = R_{2-2} / Z_{TP}$, где Z_{TP} – волновое сопротивление отрезка линии, примыкающей к петле связи. Если выбрать $Z_{TP} \approx R_{2-2}$ то $\beta \approx 1$.

При этом внешняя добротность резонатора, нагруженного петлей и линией с волновым сопротивлением Z_{TP} , будет $Q_{BH} \approx Q_{\Sigma}$. Коэффициент трансформации петли при согласовании:

$$m = \frac{U_0}{U_n} = \sqrt{\frac{R_{\Sigma}}{8\beta Z_{TP}}} \approx 220, \text{ где } U_0, U_n - \text{ амплитуды}$$

ВЧ напряжения между проводниками резонатора и на петле соответственно, а шунтовое сопротивление определено как: $R_{\Sigma} = \frac{(2U_0)^2}{P_{\Sigma}}$, напряжение

между проводниками резонатора: $U_0 \approx 1,021 \text{ МВ}$.

Форма и ширина петли, радиус установочного отверстия в стенке резонатора, поперечные размеры коаксиальной линии были выбраны из конструктивных соображений.

Вариант исполнения петли, представлен на рис. 4.

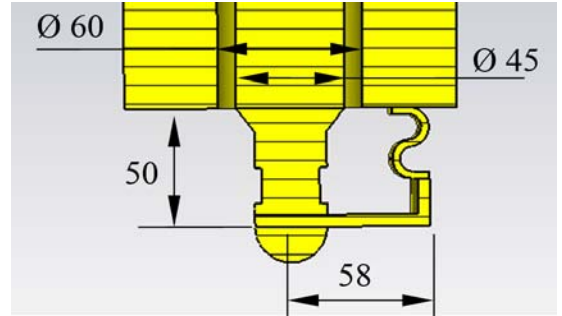


Рис. 4. Геометрия петли связи

Для расчетов параметров петли (её индуктивности и эффективной площади, параметров связи с резонатором – внешней добротности и коэффициента трансформации) проведен трехмерный численный электродинамический анализ, который дал следующие результаты:

- Индуктивное сопротивление на рабочей частоте $X_L = \omega_0 L_n = 20,5 \text{ Ом}$. Плоскость отсчета индуктивности совпадает с верхней стенкой резонатора.

- Эффективная площадь $S_{эф} = 24 \text{ см}^2$, если угол поворота петли $\alpha = 0^\circ$. При этом плоскость петли перпендикулярна силовым линиям магнитного поля.

- Внешняя добротность резонатора $Q_{0вн} \approx 8,5 \cdot 10^3$ ($\alpha = 0^\circ$). При $\alpha = 42^\circ$ внешняя добротность $Q_{вн} = Q_{0вн} / \cos^2 \alpha \approx 15,4 \cdot 10^3$, что требуется для согласования при ускорении проектного тока пучка.

- Коэффициент трансформации $m_0 \approx 163$ ($\alpha = 0^\circ$).

При $\alpha = 42^\circ$ коэффициент трансформации $m = m_0 / \cos \alpha \approx 220$, что требуется для согласования. Подобным образом, возможно подобрать угол установки петли (требуемый для обеспечения согласования) для подаваемого ВЧ сигнала любого уровня мощности.

Как следует из эквивалентной схемы (рис. 3), подводный фидер генератора, реактивный согласующий шлейф и выходная линия образуют коаксиальный тройник. Из конструктивных соображений принята следующая компоновка: два плеча тройника (шлейф и четвертьволновый трансформатор) имеют общую ось, а ВЧ ввод осуществляется со стороны плеча, перпендикулярного к этой оси (рис. 5).

При такой компоновке с использованием внутреннего проводника шлейфа и четвертьволнового трансформатора удобно осуществить подвод воды для охлаждения области вакуум-атмосферного окна связи. Вакуум-атмосферное окно связи расположено непосредственно перед петлей связи. На этом участке заметно нарушается регулярность ТЕМ волны. Влияние неоднородности усиливается из-за достаточно больших размеров изолятора и тройника по отношению к рабочей длине волны. Таким образом, трансформатор между сечениями 3-3 и 4-4 представляет собой неоднородную коаксиальную линию со значительными возмущениями поля в переходной области, то есть в области изолятора.

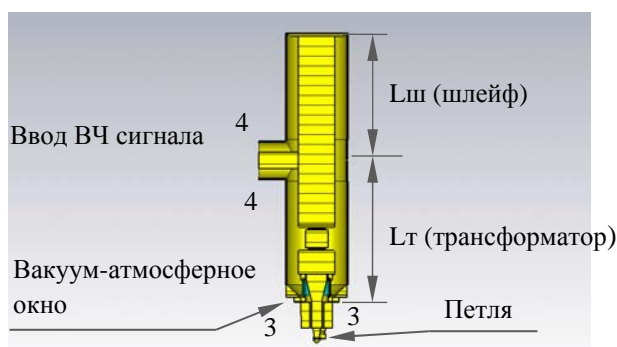


Рис. 5. Компоновка УВМ

Относительно большие размеры тройника и расположение его плеч вносят особенности и в работу шлейфа, предназначенного для компенсации реактивной проводимости в сечении 4-4. Как результат, изменение длины шлейфа может приводить не только к изменению входной реактив-

ной проводимости в сечении 4-4, но и к некоторому изменению активной части проводимости.

В силу указанных особенностей наиболее достоверные результаты можно получить при трехмерном анализе устройства, при помощи компьютерного моделирования.

На первом этапе расчетов исследовался узел без индуктивной нагрузки, то есть в сечении 3-3 (рис. 5) выходная линия была нагружена на согласованное сопротивление $Z_0 = 18$ Ом [6]. Это делалось с целью получения наилучших характеристик согласования участка неоднородной линии в области изолятора и получения матрицы рассеяния эквивалентного четырехполюсника между сечениями 4-4 и 3-3, близкой к матрице четвертьволнового трансформатора. Согласование достигалось выбором формы и размеров проводников неоднородной линии в области изолятора.

В дальнейшем проводилось численное моделирование с учетом индуктивности петли. Проверялась возможность компенсации входной реактивной проводимости в сечении 4-4 (рис. 5) и достижения согласования с КСВН ≈ 1 выбором длины шлейфа.

На рис. 6 представлено семейство расчетных кривых соответствующих КСВН УВМ, полученных при различных длинах параллельного шунта и небольшой вариации размера четвертьволнового трансформатора. Минимальное значение КСВН ($\text{КСВН} \leq 1,05$) в сечении 4-4 (рис. 5) УВМ на частоте $\approx 9,9$ МГц получено при $L_{ш} = 605$ мм и при $L_{тп} = 600$ мм.

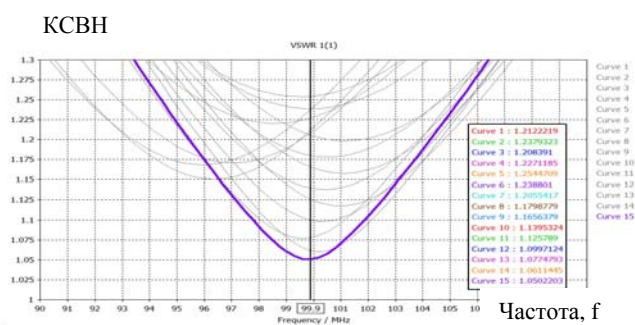


Рис. 6. Оптимальный КСВН УВМ с индуктивной нагрузкой, настроенного на рабочую резонансную частоту

3. Нахождение местоположения индикаторной петли – датчика, работающего в цепи частотной обратной связи питающего ВЧ генератора

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 – высокооборотная 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 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 концах петли возникнет разность потенциалов, которая будет зафиксирована системой управления ВЧ генератора. Генератор в этом случае автоматически начнет перестраивать несущую частоту, таким образом, пока на петле не перестанет наводиться напряжение. Его отсутствие будет говорить о том, что система настроена в резонанс с ускоряющим резонатором.

В результате расчетов требовалось определить место установки индикаторной петли в передающем фидере.

Ниже приведены результаты трехмерного электродинамического расчета системы (рис. 7), состоящей из передающего фидера, УВМ и ускоряющего резонатора. В расчетах использованы выше представленные результаты проектирования и настройки УВМ. Петля установлена в положение обеспечивающее согласование в режиме так называемого «нулевого тока» пучка, когда вся передаваемая мощность ВЧ сигнала трансформируется в мощность потерь в стенках резонатора.

На рис. 8 приведено расчетная зависимость КСВН на входе резонансной ускоряющей систе-

мы. На частоте 99,93 МГц КСВН = 1,1 – это режим согласования, при котором в передающем фидере устанавливается режим бегущей волны. ВЧ сигнал практически без потери мощности передается в резонатор.

На рис. 9(а) представлено распределение электрической напряженности в передающем фидере в случае согласования (частота 99,93 МГц). Случай рассогласования с возникновением стоячей волны иллюстрирует рис. 9(б), на котором отображено распределение электрической напряженности в передающем фидере на частоте 100,02 МГц. Первый узел напряжения возникает на расстоянии в 600 мм от начала отсчета на линии проецирования (рис. 7).

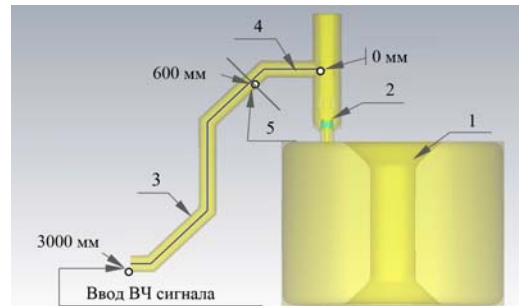


Рис. 7. Расчетная модель резонансной ускоряющей системы: 1 – ускоряющий резонатор; 2 – УВМ; 3 – передающий фидер; 4 – линия проецирования; 5 – сечение для установки индикаторной петли

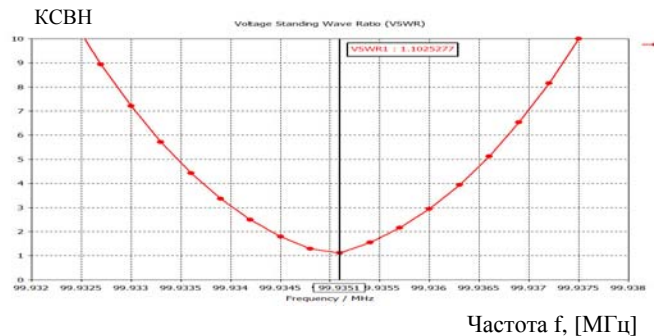


Рис. 8. Расчетное значение КСВН на входе резонансной

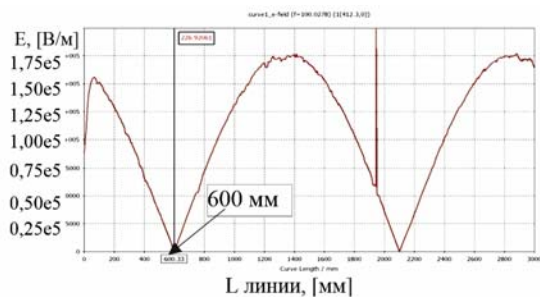
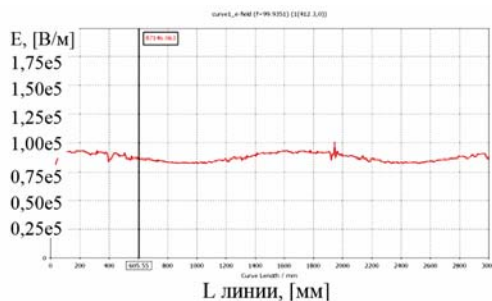


Рис. 9. Расчетные зависимости напряженности электрического поля вдоль оси передающего волновода при: а) согласовании, б) рассогласовании

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

Таблица 1

Расчетная зависимость напряжения на петле от её размеров и площади

l, [мм]	h, [мм]	Sп, [мм ²]	Uп, [В]
7	8	56	141,96
4	2	8	55,09
3	2	6	25,04
3	1,5	4,5	15,53

4. Калибровочный расчет измерительной индуктивной петли – составной части цепи амплитудной обратной связи ВЧ генератора

Вторая цепь обратной связи ВЧ генератора с резонатором – амплитудная, главным назначением которой является контроль ускоряющего напряжения на резонаторе. Основной элемент цепи – магнитная петля, установленная на торцевой стенке резонатора диаметрально противоположно месту установки УВМ (рис. 10).

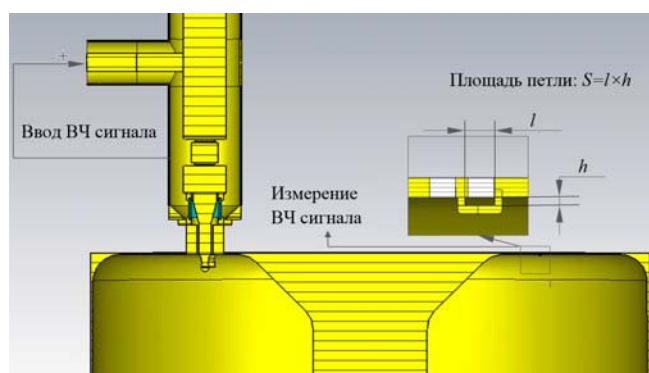


Рис. 10. Фрагмент расчетной модели ускоряющего коаксиального резонатора с измерительной индуктивной петлей (в цепи амплитудной обратной связи ВЧ генератора)

Для запуска генератора требуется прокалить измерительную петлю – определить её оптимальную площадь (выбрать высоту h и ширину l) так, чтобы напряжение, наводимое на её концах при мощности, подаваемой на вход УВМ – 180 кВт не превышало уровня 20 В. Данное требование задано условиями работы системы управления ВЧ генератора.

В табл. 1 представлены результаты трехмерных электродинамических расчетов модели, включающей в себя УВМ, резонатор и измерительную петлю. На вход УВМ подавался ВЧ сигнал (99,9 МГц), со средней мощностью 180 кВт. Площадь измерительной петли последовательно уменьшалась с изменением ее высоты и ширины в пределах от 56 до 4,5 мм².

Требуемое значение наводимого на петле ВЧ напряжения достигается при площади петли – 5÷6 мм².

5. Расчет конструкции сдвоенной согласованной нагрузки

Для выполнения работ по введению в действие составного модуля мощного ВЧ генератора, потребовался его предварительный запуск и отработка режимов включения на согласованную нагрузку. Предельные выходные параметры ВЧ модуля – непрерывный ВЧ сигнал со средней мощностью 180 кВт на частотах от 98 до 102 МГц. Разработка и изготовление коаксиальной согласованной нагрузки для испытаний ВЧ генератора была выполнена на основе имеющихся резистивных элементов С2-25-100 (50 Ом) с водяным охлаждением. Предельная мощность рассеяния на одном таком элементе – 100 кВт.

На предварительном этапе выполнен оптимизационный расчет одиночной согласованной нагрузки с коаксиальным входом 160/70 мм, с целью выбора её оптимальной геометрии. На рис. 11 приведена оптимизированная конструкция нагрузки с КСВН = 1,07 на частоте 100 МГц. Оптимизация достигалась при изменении формы согласующего конуса.

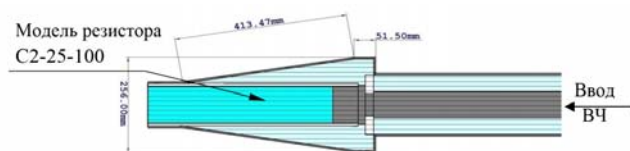


Рис. 11. Одиночная коаксиальная нагрузка

На рис. 12 показана конструкция, собранная на основе двух однотипных коаксиальных нагрузок и коаксиального тройника, позволяющая работать с ВЧ сигналом мощностью до 200 кВт.

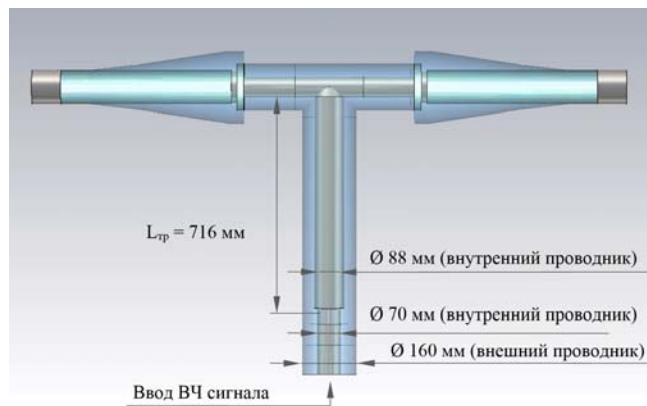


Рис. 12. Модель согласованной сдвоенной коаксиальной нагрузки, рассчитанной на поглощение ВЧ сигнала со средней мощностью до 200 кВт

Согласование конструкции обеспечивается включением четвертьволнового трансформатора во входную линию. Конструктивно четвертьволновый трансформатор выполнен за счет утолщения центрального проводника. Его длина составляет – $L_{тр} = 716$ мм. Волновое сопротивление данного участка определяется как:

$W = \sqrt{W_1 + W_2} = \sqrt{50 \cdot 25} = 35,35$ Ом, диаметр внутреннего проводника – 88 мм ($W = \frac{60 \ln R_2}{R_1}$).

На рис. 13 представлен расчетный КСВН на входе сдвоенной согласованной нагрузки (КСВН = 1,14, $f = 100$ МГц).

Заключение

Описаны методы трехмерного компьютерного моделирования составных частей ускоряющей резонансной ВЧ системы электронного ускорителя БЭТА-8.

Проведенные расчеты представляют практическую ценность для конструирования, производства и точной настройки таких определяющих узлов ВЧ системы как УВМ и согласованная сдвоенная коак-

сиальная нагрузка, рассчитанная на поглощение ВЧ сигнала со средней мощностью до 200 кВт.

Монтаж УВМ на ускоряющий коаксиальный резонатор является одновременно сложным и особо ответственным мероприятием, не допускающим грубых ошибок. Поэтому минимизация усилий по поиску оптимального местоположения петли УВМ, за счет полученных результатов проведенного трехмерного электродинамического расчета, является важным шагом в получении требуемого согласования связки из передающей линии и ВЧ генератора с УВМ и ускоряющим резонатором.

Расчетное нахождение места расположения индикаторной петли в передающем фидере позволит существенно облегчить экспериментальное определение положения узлов напряжения в линии в случае рассогласования. Следствием этого является упрощение работы при возможной последовательной сборке и разборке конструкции передающего ВЧ фидера при установке индикаторной петли.

Расчет измерительной петли, работающей в цепи амплитудной обратной связи ВЧ генератора, позволяет разработать оптимальную конструкцию амплитудного датчика на ее основе.

Список литературы

1. С. А. Железов, Н. В. Завьялов, С. Т. Назаренко, В. В. Порхаев, В. Т. Пунин, С. А. Путевской, М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов Проект электронного резонансного ускорителя непрерывного действия.// VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Сборник докладов. 2006 г.Саров – С.122-128.
2. Е. Н. Гладышев, В. С. Гордеев, Н. В. Завьялов, Н. Н. Кузнецова, С. М. Придчин, С. А. Путевской И. С. Селин, Н. П. Ситников, М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов, С. М. Тресков, И. В. Шориков, В. Е. Юрлов Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЭТА-8.//

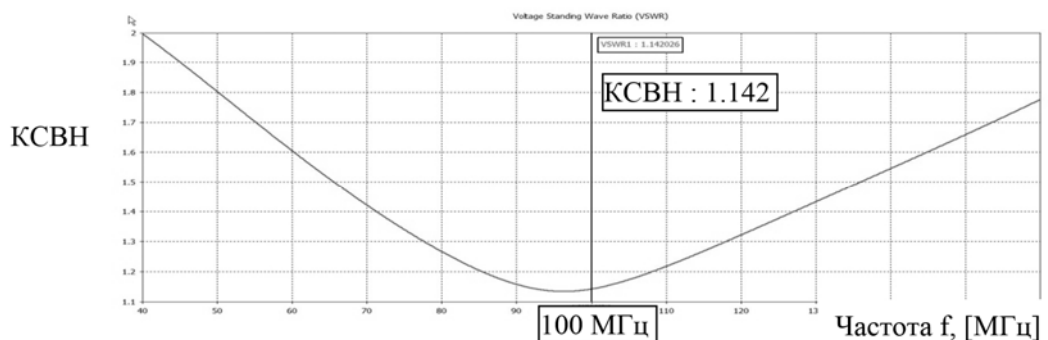


Рис. 13. Расчетное значение КСВН на входе сдвоенной коаксиальной нагрузки

Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ Выпуск 20, часть 1. 2015 г. Саров – С.184-193.

3. N.V. Zavyalov, S.A. Zhelezov, S.T. Nazarenko, V.V. Porkhaev, V.T. Punin, S.A. Putevskoy, M.L. Smetanin, A.V. Telnov A CW Electron Accelerator.

The Planned Design and Electrophysical Characteristics.// Problems of Atomic Science and Technology. 2006 №2 Series: Nuclear Physics Investigations (46), – P. 8-10.