

Выбор оптимальных размеров трансформатора типа волны в отношении электрической прочности

Н.П.Собенин

Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), Россия

Введение

Проблеме расчета и экспериментального исследования трансформатора типа волны (ТТВ) из прямоугольного волновода в круглый диафрагмированный волновод (КДВ) посвящен ряд работ. Поскольку численный расчет размеров ТТВ с использованием современных программ весьма сложен и не всегда возможен, задача может быть решена с использованием приближенных аналитических формул [1] с последующим уточнением размеров по результатам экспериментальной настройки [2]. В связи с разработкой линейных электронно-позитронных коллайдеров с прецизионными параметрами ускоренного пучка к ТТВ были предъявлены дополнительные требования, а именно симметризация электромагнитного поля в области пролета пучка и повышение электрической прочности ТТВ.

В ряде ускорительных лабораторий мира были предложены и разработаны различные конструкции симметризованных ТТВ [3]. Наши исследования в этом направлении были посвящены ТТВ для ускоряющей структуры линейного коллайдера DESY SBLC [4]. Был проведен комплекс работ в этом направлении, включая разработку эквивалентной схемы ТТВ с КДВ на основной и гибридной волне, развитие метода настройки ТТВ с использованием подвижного короткозамыкателя в КДВ. В частности, было показано, что при превышении коэффициента связи ТТВ с первой ячейкой КДВ над коэффициентом связи КДВ в 1,41 можно получить более широкополостное согласование ТТВ с КДВ и повысить электрическую прочность ТТВ [5].

Вопросу превышения электрической прочности ТТВ с использованием резонансного макета посвящена работа [6], выполненная для ускоряющей секции линейного коллайдера ВЛЭПП. В частности, было экспериментально установлено, что при уменьшении высоты ТТВ в два раза по сравнению с периодом КДВ напряженность электрического поля на оси ТТВ уменьшилась на 10% по сравнению с полем в КДВ.

1. Объект и метод исследования

В качестве объекта при исследовании электрической прочности ТТВ в функции его размеров был выбран входной ТТВ для ускоряющей секции линейного коллайдера DESY SBLC [7]. На рис. 1 изображен такой ТТВ с отрезком КДВ. Показана половина устройства, причем КДВ состоит из четырех ячеек с короткозамкнутой последней ячейкой в середине диафрагмы. КДВ рассчитан на вид колебаний $2\pi/3$ и фазовую скорость волны равную скорости света на частоте

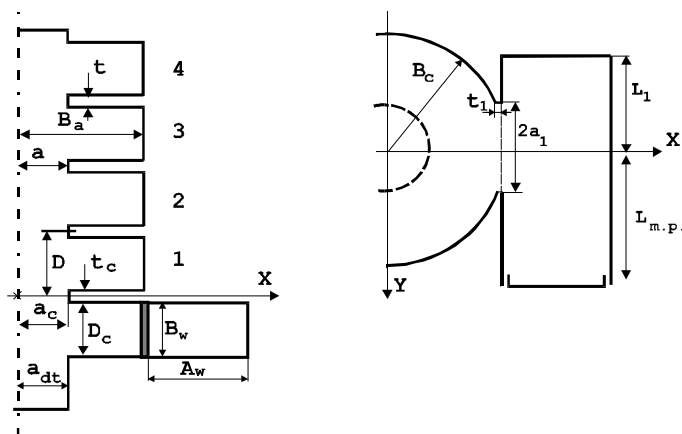


Рис. 1: Резонансный макет.

2998 МГц. Размеры КДВ и ТТВ обозначены на рис. 1. Прямоугольный волновод с размерами $A_w = 72$ мм, $B_w = 28,33$ мм имел с одного конца короткозамыкающую пластину на расстоянии $L_1 = 24$ мм от центра. Размеры КДВ в процессе расчетов не менялись и соответствовали размерам первой ячейки ускоряющей шестиметровой секции DESY SBLС: период структуры $D = 33,32$ мм, диаметр ячейки $2B_a = 81,26$ мм, диаметр отверстия в диафрагме $2a = 31,02$ мм и толщина диафрагмы $t = 5$ мм. Следует отметить, что из-за невозможности проведения многочисленных весьма трудоемких расчетов при наличии скруглений отверстий диафрагм все результаты были получены для КДВ без скруглений. В этой связи диаметр ячейки был рассчитан с учетом этого обстоятельства.

Первоначальные размеры ТТВ, обеспечивающие его согласование на рабочей частоте следующие: диаметр $2B_c = 68$ мм, толщина диафрагмы между ТТВ и первой ячейкой КДВ $t_c = 5$ мм, толщина диафрагмы между ТТВ и прямоугольным волноводом $t_1 = 5$ мм, размеры отверстия окна связи между ТТВ и прямоугольным волноводом $2a_1 = 36,5$ мм, $B_w = 28,33$ мм, диаметр отверстия в первой диафрагме $2a_c = 31,02$ мм и диаметр отверстия в трубке дрейфа $a_{dt} = 31,02$ мм. Для определения коэффициента k_1 , представляющего собой отношение максимальных величин продольной составляющей напряженности электрического поля на оси ТТВ ($E_{z,max,c}$) и КДВ ($E_{z,max,кдв}$), использовался резонансный макет вида рис. 1 с подвижным короткозамыкающим поршнем. Положение этого поршня $L_{m.p.}$ подбиралось в процессе расчетов так, чтобы в отрезке КДВ устанавливался вид колебаний $2\pi/3$, т.е. резонансный макет должен быть настроен на частоту 2998 МГц. Число ячеек в резонансном макете варьировалось с дискретностью поля ячейки. Такая схема расчетов аналогична схеме, использованной ранее нами при экспериментальном определении параметра k_1 [6].

На рис. 2 приведены зависимости резонансной частоты исследуемого макета в функции $L_{m.p.}$ при числе ячеек $N = 2 + 1/2; 3 + 1/2; 4; 4 + 1/2; 5$, а на рис. 3 изображена зависимость величины k_1 в процентах в функции числа ячеек (и полуячеек), составляющих резонансный макет. Эта зависимость построена для интересующего нас случая возбуждения в КДВ вида колебаний $2\pi/3$ на частоте 2998 МГц. Максимальное значение величины k_1 наблюдается в резонансном макете, состоящем из шести связанных резонаторов, включая четыре ячейки КДВ, полость ТТВ и призматический резонатор.

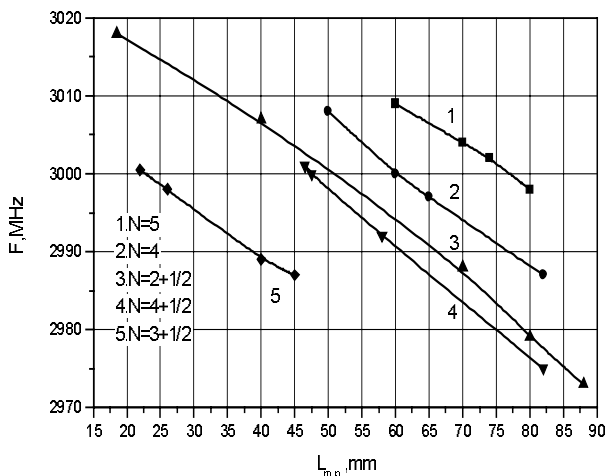


Рис. 2: Зависимость резонансной частоты от $L_{m.p.}$ при параметре N .

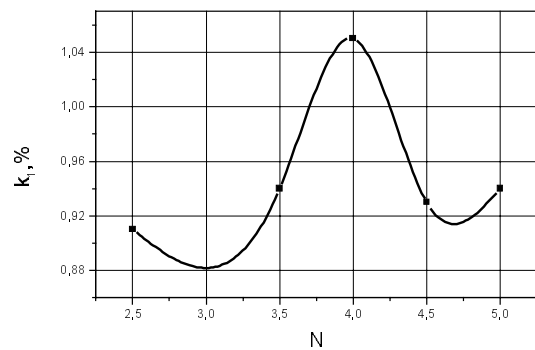


Рис. 3: Зависимость k_1 от N .

Для такого резонансного макета на рис. 4а,б,в изображены силовые линии электрического поля в плоскостях XZ (а) и X, Y (б) и распределение продольной и поперечной составляющих электрического поля вдоль структуры (в, г).

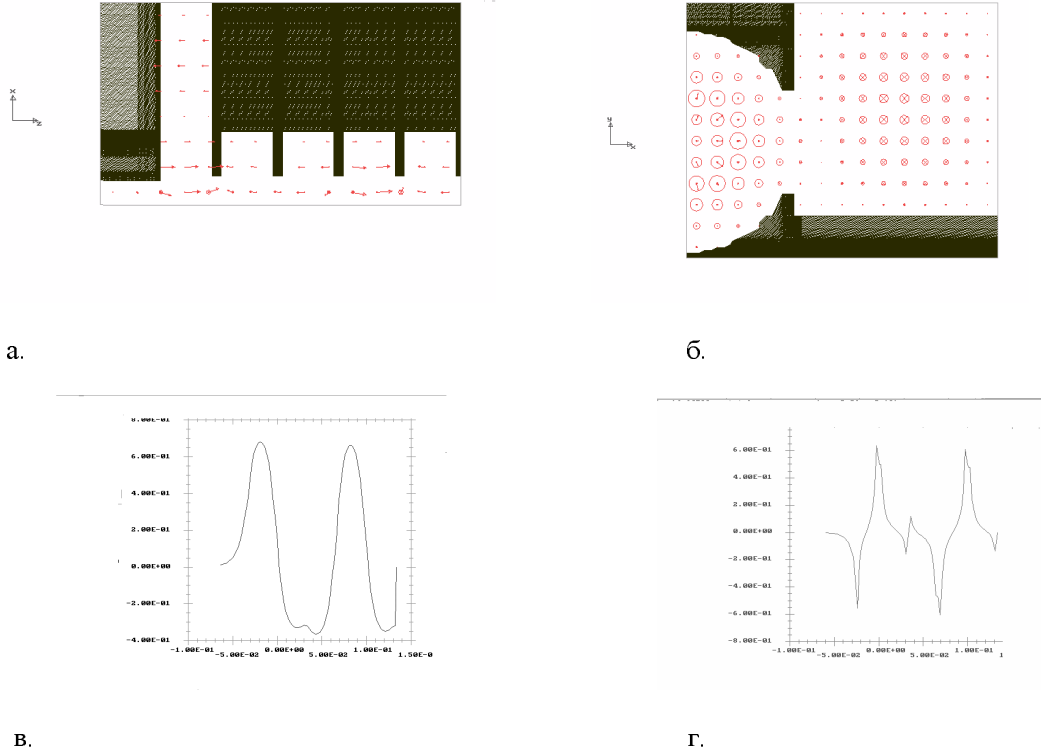


Рис. 4: Силовые линии электрического поля в плоскостях X, Z (а) и X, Y (б); E_z (в) и E_x (г) компоненты поля вдоль координаты z структуры с размером $D_c = 28, 33$ мм (E_z — компонента на оси структуры, а E_x — компонента при $X = a_c$).

2. Результаты расчетов

Все нижеприведенные зависимости получены в результате численного расчета структуры, изображенной на рис. 1, с использованием электрических граничных условий за исключением $X = 0$, где применялась магнитная стенка. При изменении какого-либо размера ТТВ восстанавливалась частота резонансного макета 2998 МГц путем соответствующего выбора положения поршня $L_{m.p.}$. В процессе расчетов были определены зависимости коэффициента k_1 в функции высоты ТТВ ($D_c = B_w$), толщины диафрагмы (t_c) между ТТВ и первой ячейкой КДВ, а также диаметра ТТВ ($2B_c$).

Зависимость 1 на рис. 5а соответствует отношению $E_{z,max.c.}$ к $E_{z,max.кдв.}$, а в случае зависимости 2 вместо $E_{z,max.кдв.}$ используется среднее значение максимальных величин $E_{z,кдв.}$ компоненты поля в ячейках макета КДВ. Зависимости на рис. 5г соответствуют отношению максимальных значений поперечной компоненты на поверхности трубки дрейфа, $E_{x,0}$ к соответствующей компоненте поля на поверхности диафрагмы $E_{x,4}$ (линия 1) и компоненте поля на поверхности диафрагмы между ТТВ и КДВ $E_{x,1}$, к $E_{x,4}$ (линия 2). Характер зависимости $E_x(z)$ изображен на рис. 4г. Из рис. 5г видно, что максимальные значения поперечных компонент поля на поверхности диафрагм $E_{x,1}$ и $E_{x,4}$ примерно одинаковы и мало меняются с изменением толщины диафрагмы.

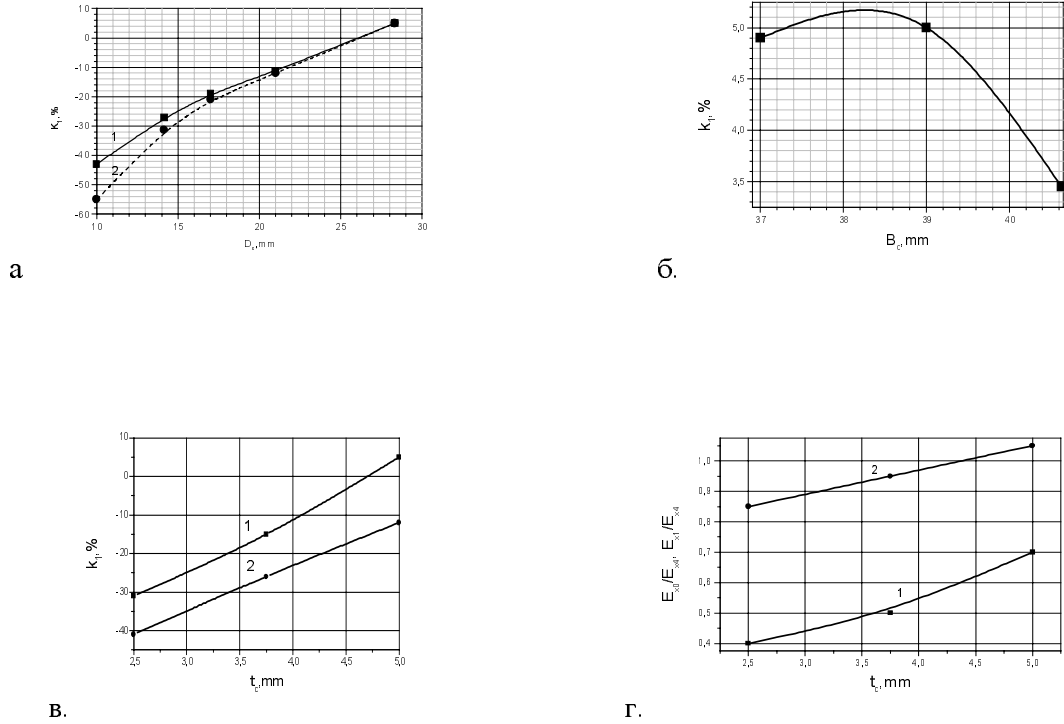


Рис. 5: (а) — зависимость k_1 от D_c для структуры с $2B_a = 81,26$ мм, $2B_c = 78$ мм, $t_c = 5$ мм; (б) — зависимость k_1 от B_c для структуры с $2B_a = 81,26$ мм, $D_c = 28,33$ мм, $t_c = 5$ мм; (в) — зависимость k_1 от t_c для структуры с $2B_a = 81,26$ мм, $2B_c = 78$ мм (зависимость 1 при $D_c = 28,33$ мм, зависимость 2 при $D_c = 21$ мм); (г) — зависимости E_{x0}/E_{x4} (кривая 1) и E_{x1}/X_{x4} (кривая 2) в функции t_c для структуры с $2B_a = 81,26$ мм, $2B_c = 78$ мм и $D_c = 21$ мм.

Список литературы

- [1] Sobenin N.P., Zverev B.V. Analytical calculation of a coupler for the linear collider accelerating section. Proc. of the Fourth European Particle Accelerator Conference, 1994, v. 3, pp. 2022-2024.
- [2] Вальднер О.А., Собенин Н.П., Зверев Б.В., Щедрин И.С. Диафрагмированные волноводы. Справочник. — Энергоатомиздат, 1991.
- [3] Deruyter H., Hoag H., Ko K. Symmetrical double input coupler development. Proc. of the 16-th International Linac Conference (LINAC-92), 1992, pp. 407-409.
- [4] Holtkamp H., Weiland T. Structure work for an S-band linear collider. Proc. of 15-th International Conference on High Energy Accelerators, 1992, pp. 830-832.
- [5] Sobenin N.P., Kaljuzhny V.E. Theoretical and experimental study of linear collider accelerating structures impedance characteristics. Proc. of the Third European Particle Accelerator Conference, 1992, v. 2, pp. 892-894.
- [6] Sobenin N.P., Kaljuzhny V.E. The investigation of coupler for linear collider accelerating section. Proc. of the Third European Particle Accelerator Conference, 1992, v. 2, pp. 1226-1227.
- [7] Sobenin N.P., Kravchuk L.V., Holtkamp N. DESY linear collider acceleration section coupler. Proc. of the 17-th International Linac Conference (LINAC-94), 1994, pp. 2025-2027.