

Расчет поперечного импульса в суперструктуре, вызванного устройствами ввода мощности и вывода высших типов волн

А.А. Завадцев, М.В. Лалаян, Д.В. Костин, Н.П. Собенин.
Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), Москва, Россия

В.И. Шведунов,
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия

Проведены расчеты динамики пучка в суперструктуре линейного электрон-позитронного коллайдера TESLA с учетом влияния асимметрии электромагнитного поля в устройствах ввода мощности и вывода высших типов волн. Необходимые для таких расчетов электромагнитные поля получены по программе MAFIA. При расчете полей с устройствами вывода высших типов волн — режим стоячей волны, а в случае устройства ввода мощности рассматривался режим бегущей волны. Работа выполнена при финансовой поддержке DESY (Германия).

1. Методики расчета полей

На рис.1 показано расположение устройств ввода ВЧ-мощности (FM) и вывода волн высших типов (НОМ), соответствующее схеме суперструктуры коллайдера TESLA [1]. Оценка величины поперечного импульса, получаемого частицей при движении в областях с асимметричным полем, и влияния этого импульса на параметры ускоряемого пучка проводилась с помощью программы трёхмерного электродинамического моделирования MAFIA для соответствующей геометрии ускоряющих резонаторов, устройства ввода мощности (FM) и пяти устройств вывода мощности волн высших типов (НОМ1 – НОМ5). Затем эти данные экспортировались в программу RTMTRACE [2], с помощью которой проводились расчёты динамики ускоряемого пучка.

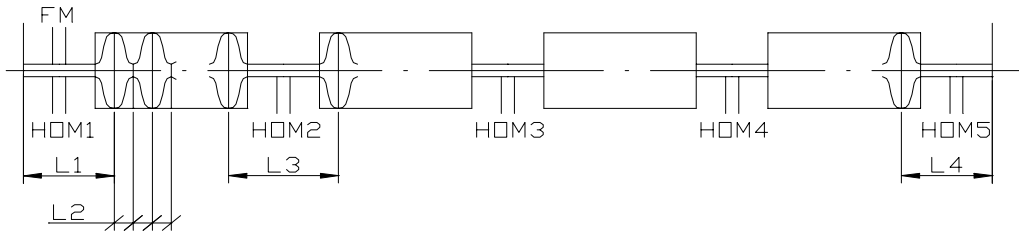


Рис. 1. Схема суперструктуры с устройствами ввода и вывода мощности.

Для корректного моделирования динамики частиц при их движении в ускоряющей структуре было сделано разбиение суперструктуры на отдельные составляющие с последующей шивкой полей. Для расчёта были взяты следующие элементы: концевая ячейка резонатора с узлом ввода мощности и пролётной трубкой, симметричная средняя ячейка и дрейфовая трубка с устройством вывода мощности волн высших типов. Расчёт последних двух элементов производился для случая стоячей волны по модулю E программы MAFIA.

В области входного устройства электромагнитная волна является бегущей, и для ее расчёта были использованы две методики — синтез полей бегущей волны по результатам двух решений для стоячих волн и расчёт во временной области с использованием модуля T3. Благодаря наличию плоскости симметрии достаточно было смоделировать только половину устройства ввода мощности, что привело к сокращению необходимого объёма памяти и времени расчёта. Количество узлов пространственной сетки равнялось примерно 1330000 при минимальном шаге между узлами 1 мм в приосевой области с разрежением до 5 мм в области малого поля в трубке дрейфа.

При расчете бегущей волны в коаксиальном вводе мощности FM путем синтеза полей двух стоячих волн необходимый сдвиг фазы был получен изменением граничного условия в линии передачи с электрического на магнитное при соответствующем выборе положения референсной плоскости в линии. На первом этапе расчёта положение одной референсной плоскости фиксируется в медианной плоскости диафрагмы первой ячейки (см. рис.2), а координата второй плоскости $y_{гр}$ выбирается таким образом, чтобы частоты f_c , f_m , и рабочая частота f_0 были равны (f_c – частота, соответствующая электрическим стенкам в референсных плоскостях 1 и 2, f_m – то же для магнитных стенок). На втором этапе рассчитываются поля в режиме бегущей волны в устройстве ввода. Для этого рассчитываются компоненты поля: $E_{x,y,z}^{(e)}$, $B_{x,y,z}^{(e)}$ – для электрических граничных условий и $E_{x,y,z}^{(m)}$, $B_{x,y,z}^{(m)}$ – для магнитных граничных условий. Затем проводится их нормировка.

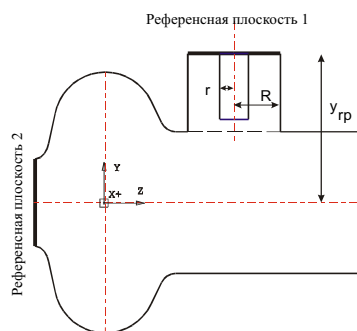


Рис. 2. Модель узла ввода мощности и положение референсных плоскостей.

Расчёт во временной области с использованием модуля ТЗ предполагает для возбуждения полей в ячейке использовать схему, состоящую из двух пучков, или импульсов тока [3].

2. Результаты расчета динамики пучка

В процессе расчета динамики пучка по аналогии с [4] поперечный импульс, получаемый пробными частицами, представлялся в виде следующего разложения:

$$\Delta \vec{p}_t = D_x \vec{x}_0 + D_y \vec{y}_0 + F(x\vec{x}_0 + y\vec{y}_0) + Q(x\vec{x}_0 - y\vec{y}_0) + S(y\vec{x}_0 + x\vec{y}_0),$$

где $\Delta \vec{p}_t$ — поперечный импульс, \vec{x}_0, \vec{y}_0 — единичные векторы для горизонтального и вертикального направлений, x, y — начальные смещения частиц, D_x, D_y — дипольные компоненты импульса, F, Q, S — фокусирующие силы, соответственно азимутальная, квадрупольная и косая квадрупольная. Следует отметить, что для аксиально-симметричной структуры $D_x = D_y = 0$, $Q = S = 0$.

В общем случае все указанные компоненты отличны от нуля, что, в частности, имеет место для устройств вывода высших типов волн и, за исключением F , не зависят от энергии.

Таким образом, результаты расчетов, выполненных для произвольной (релятивистской) энергии, могут быть использованы для анализа при других энергиях пучка. Для устройства ввода мощности, обладающего симметрией по отношению к плоскости $y-z$, $S = 0$. Что касается азимутальной фокусирующей силы F , она убывает с ростом энергии, всегда обеспечивает фокусировку пучка ($F < 0$), максимальная фокусировка имеет место для фазы максимального торможения пучка.

Интегрирование уравнений движения начинается от входа в пролетный канал со стороны расположения узла ввода мощности и ведется до выхода из суперструктуры. Компоненты электромагнитного поля на траектории движения частиц вычисляются путем интерполяции 3-го порядка результатов расчета по программе MAFIA с предварительной нормировкой и с учетом конкретной геометрии и условий симметрии, использованных в расчетах полей. Сравнение с зависимостью изменения энергии пучка от изменения фазы частиц по отношению к полю позволяет осуществить привязку величины поперечного импульса к фазе максимального ускорения. Для оценки вклада в поперечный импульс НОМ и FM устройств связи были выполнены независимые расчеты суперструктуры, содержащей пять идентичных НОМ устройств связи, и расчеты суперструктуры с различными вариантами устройства ввода мощности.

На рис. 3 показан пример расчета по программе RTMTRACE зависимости энергии частиц на выходе суперструктуры от фазы на ее входе – (а) и зависимости рассчитанного дипольного момента от фазы для варианта #5а узла ввода мощности, а также аппроксимация указанных зависимостей функцией вида $A = A_0 \cos(\varphi + \varphi_{A0})$ – (в).

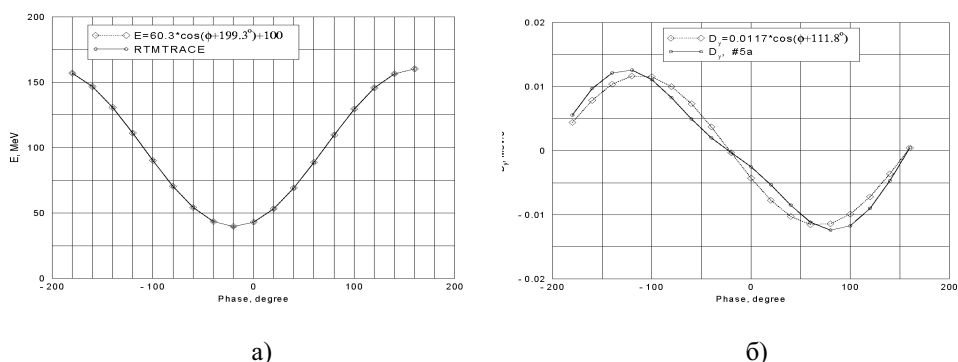


Рис. 3. Зависимость энергии частиц и дипольной компоненты поперечного импульса от фазы.

Результаты расчета для НОМ устройств связи и двух вариантов узлов ввода мощности приведены в табл. 1. Для удобства сравнения все результаты, приведенные в табл. 1, нормированы на одинаковый прирост энергии в суперструктуре, равный 60 МэВ для начальной энергии частиц 100 МэВ, кроме того, опорная плоскость отсчета фазы частиц помещена во всех случаях на таком расстоянии от центра первой ускоряющей ячейки, что прирост энергии максимален для фазы 180° . Таким образом, во всех случаях, приведенных в табл. 1, зависимость энергии частиц на выходе суперструктуры от их фазы на входе описывается выражением $E = 60 \cos(\varphi + 180^\circ) + 100$ МэВ. Для узла ввода мощности #3 приведены результаты расчетов со стоячей (SW) и бегущей (TW) волнами. Эти варианты дают близкие значения фазы поперечного импульса, но различаются по амплитуде в 1.6-1.7 раз. Учитывая высокую чувствительность амплитуды асимметричных компонент поля к положению опорной плоскости в расчетах узла ввода мощности в режиме стоячей волны, мы полагаем эти расчеты менее точными и в дальнейшем анализе не используем.

Таблица 1. Дипольные компоненты поперечного импульса и квадрупольные фокусирующие силы.

Тип	D_{x0} , кэВ/с	φ_{Dx0}	D_{y0} , кэВ/с	φ_{Dy0}	Q_0 , кэВ/с/м	φ_{Q0}	S_0 , кэВ/с/м	φ_{S0}
НОМ, SW	1.3 ± 0.1	325^0	6.7 ± 0.1	393^0	212 ± 7	218^0	22 ± 7	230^0
FM, #3, SW	--	--	1.4 ± 0.1	125^0	40 ± 7	293^0	--	--
FM, #3, TW	--	--	2.3 ± 0.1	129^0	69 ± 7	291^0	--	--
FM, #5a, TW	--	--	11.7 ± 0.1	93^0	337 ± 7	266^0	--	--

Величина поперечного импульса для устройства ввода мощности оценивалась также путём вычисления интегралов полей бегущей волны непосредственно с помощью средств программы MAFIA. Вычисление интегралов полей начинается от области диафрагмы, при этом для учёта направления движения частиц (которое происходит со стороны устройства ввода мощности вдоль пролётной трубки к ячейке) изменялся знак V_x компоненты. Абсолютная величина поперечного импульса, рассчитанная на основании интеграла для нормировки поля, соответствующей данным табл.1, составляет 2.37 кэВ для варианта узла #3, и, таким образом, достаточно близка к величинам D_{y0} . Следует отметить, что при вычислении интегралов на оси возможна оценка только дипольной компоненты импульса.

Непосредственный интерес при изучении роли асимметричных компонент поля представляют величины поперечных импульсов и фокусирующих сил для фазы частицы, соответствующей фазе максимального ускорения. Эти данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Дипольные компоненты поперечного импульса и квадрупольные фокусирующие силы.

Тип	D_{x0} , кэВ/с	D_{y0} , кэВ/с	Q_0 , кэВ/с/м	S_0 , кэВ/с/м
НОМ, SW	-1.1 ± 0.1	-5.6 ± 0.1	167 ± 7	14 ± 7
FM, #3, TW	--	1.4 ± 0.1	-25 ± 7	--
FM, #5a, TW	--	0.6 ± 0.1	23 ± 7	--

Выводы

Несмотря на то, что максимальная амплитуда поперечного импульса и максимальная квадрупольная фокусирующая сила имеют место для узла ввода мощности #5a, в фазе максимального ускорения наибольшие значения этих величин обеспечиваются НОМ устройствами связи. В частности, угол наклона траектории пучка, инжектированного вдоль оси суперструктуры, составит на ее выходе за счет НОМ устройства связи около 56 мрад, а фокусное расстояние — около $6 \cdot 10^5$ м. Наибольшую опасность с точки зрения роста эмиттанса пучка представляет зависимость величины поперечного импульса от положения частиц в сгустке. Эта величина составляет для трех вариантов, представленных в табл.1 и 2, соответственно 3.6; 1.8 и 11.7 кэВ/с/радиан. Полагая длину сгустка на входе суперструктуры, равной 1 мм (фазовая длина 0.027 радиан), получаем величины роста поперечного импульса в пределах сгустка $d\sigma_{Dy}$ соответственно 0.097; 0.049 и 0.32 кэВ/с.

Литература

1. J. Sekutowicz et al. Superstructure for TESLA. Phys.Rev.Special Topics, vol.2, 1999, 062001.
2. В.Г. Геворкян, А.Б.Савицкий, М.А.Сотников, В.И.Шведунов. Программа RTMTRACE, ВИНТИ, № 183-B89, 1989.
3. M. Dohlus, S.G. Wipf. Numerical investigations of waveguide input couplers for the TESLA superstructure. – Proceedings of EPAC, 2000, Vienna, Austria, p. 2096-2099.
4. Z. Li, J.J. Bisognano and B.C. Yunn. PAC93, p.179.