

Исследование экранирующих свойств лайнера вакуумной камеры УНК

С.В. Иванов, В.В. Каталев, В.Г. Кудрявцев

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

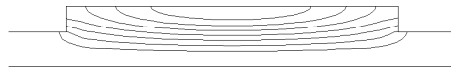
Одними из типичных и многочисленных элементов вакуумной камеры УНК-600 являются расширения (боксы), предназначенные для размещения вакуумных насосов. Интенсивный пучок может возбуждать в них паразитные электромагнитные поля, приводящие к двум неблагоприятным эффектам.

Во-первых, проникновение статического магнитного поля пучка в такие расширения приводит к появлению продольного низкочастотного индуктивного импеданса связи. Бокс для присоединения насоса имеет следующие ориентировочные размеры: длина $s \simeq 300$ мм, радиус $b \simeq 50$ мм. Индуктивность такого бокса можно оценить по формуле [1]

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot s \cdot \ln \frac{b}{a} \simeq 30 \text{ нГн},$$

где $a \simeq 30$ мм есть эффективный радиус камеры. Поскольку в УНК-600 содержится около 4000 таких боксов, то общая вносимая индуктивность равна примерно $12 \cdot 10^4$ нГн при допуске $L \lesssim 5, 2 \cdot 10^4$ нГн согласно [2].

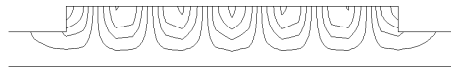
Во-вторых, высокочастотные импедансы связи расширений могут привести к когерентным неустойчивостям пучка. Согласно [3] критическая частота бокса составляет 2,36 ГГц, а критическая частота самой камеры равна 4,2 ГГц. Оценка импедансов связи запертых E -колебаний бокса была проведена с помощью программы PRUD-0. При численном моделировании эллиптические участки камеры заменялись цилиндрическими (радиус 27,5 мм) с такой же критической частотой.



E_{010} , $F=2389$ МГц, $Q=5620$, $R=6.5$ МОм, $T=0.046$, $Z/n=0.084$ Ом



E_{012} , $F=2626$ МГц, $Q=4985$, $R=4.1$ МОм, $T=0.104$, $Z/n=0.240$ Ом



E_{016} , $F=3863$ МГц, $Q=5750$, $R=2.1$ МОм, $T=0.060$, $Z/n=0.028$ Ом

Рис. 1: Высшие моды цилиндрического расширения вакуумной камеры.

На рис. 1 приводятся картины поля и расчетные параметры некоторых аксиально-симметричных мод указанного диапазона. Они отличаются числом вариаций по длине и соответствуют колебаниям типа $E_{010} - E_{017}$ цилиндрического резонатора. Согласно расчету величины приведенных импедансов связи составляют 0,0002–0,24 Ом для одного бокса

и 0,8–1000 Ом для всех боксов при допуске $\lesssim 20$ Ом [4]. Это означает, что рассмотренные неоднородности необходимо сгладить, снизив их импеданс примерно в 50 раз.

Для сглаживания неоднородностей вакуумной камеры УНК-600 используются специальные лайнеры. Лайнер представляет собой отрезок вакуумной камеры, изготовленный из нержавеющей стали толщиной примерно 0,3 мм. На поверхности лайнера имеется 26 продольных щелей размером $6,5 \times 60$ мм² для вакуумной откачки.

На рис. 2 схематично показан вакуумный бокс с установленным лайнером. Участок вакуумной камеры I эллиптического сечения ($91,5 \times 42,0$ мм²) имеет цилиндрическое расширение II диаметром 97 мм. Этот участок состоит из двух частей, соединенных сильфоном с внешним диаметром 125 мм и длиной 30–60 мм. Магниторазрядный насос присоединен к камере на участке расширения через цилиндрический патрубок III диаметром 97 мм. Лайнер IV своими контактными “лепестками” соединен с внутренней поверхностью эллиптических участков вакуумной камеры. В результате цилиндрическое расширение с сильфоном и патрубок с насосом отделены от объема камеры, где распространяются волны, возбуждаемые пучком.

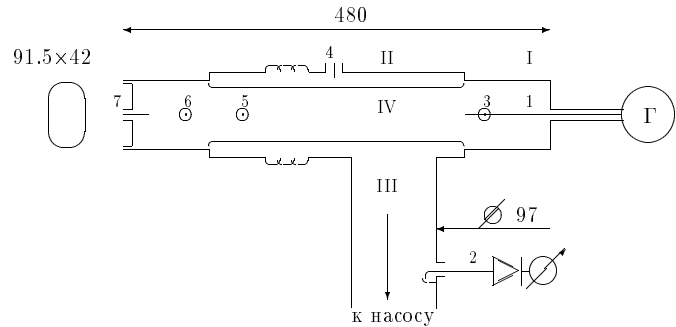


Рис. 2: Геометрия вакуумного бокса и схема измерений.

Импеданс связи отверстий в лайнере имеет индуктивный характер. Согласно [5] эквивалентная индуктивность составляет не более 0,07 нГн (или 300 нГн для всех лайнеров), что существенно ниже допуска. Очевидно также, что установка лайнера приводит к устранению высших мод цилиндрического расширения в диапазоне 2,4–4,2 ГГц (рис. 1). Однако при этом появляется другой резонатор, образованный лайнером и внешним цилиндром с патрубком и насосом. Этот резонатор может иметь заметную электромагнитную связь с камерой на более высоких частотах, когда длина волны меньше или сравнима с размерами отверстий.

Импеданс связи отверстий в лайнере имеет индуктивный характер. Согласно [5] эквивалентная индуктивность составляет не более 0,07 нГн (или 300 нГн для всех лайнеров), что существенно ниже допуска. Очевидно также, что установка лайнера приводит к устранению высших мод цилиндрического расширения в диапазоне 2,4–4,2 ГГц (рис. 1). Однако при этом появляется другой резонатор, образованный лайнером и внешним цилиндром с патрубком и насосом. Этот резонатор может иметь заметную электромагнитную связь с камерой на более высоких частотах, когда длина волны меньше или сравнима с размерами отверстий.

Экранирующие свойства лайнера в диапазоне 4–6 ГГц исследовались экспериментально. Верхняя граница диапазона определялась наличием измерительной аппаратуры. К тому же на более высоких частотах поля “проваливаются” в камеру ($f_{кр} = 4,2$ ГГц), и объем бокса не является определяющим при взаимодействии пучка с внешним окружением.

При измерениях использовался стандартный участок вакуумной камеры УНК-600 с присоединенным к нему магниторазрядным насосом (рис.).

Для оценки экранирующих свойств лайнера сравнивались уровни поля “за лайнером” и внутри камеры. Для этого ВЧ-генератором возбуждались либо вакуумная камера на E -волнах, либо внешний резонатор на его собственных частотах. При измерениях использовалась следующая аппаратура: измеритель комплексных коэффициентов передачи Р4-23, ВЧ-генераторы Г4-79, Г4-80, Г4-81, детекторные головки, гальванометр. Измерения проводились в режиме стоячих волн. Открытые концы камеры закорачивались подвижными поршнями. E -моды возбуждались продольным штырем в точке 1 (рис.). Идентификация мод проводилась путем определения составляющих поля с помощью приемных зондов, вводимых в камеру.

На рис. 3 тонкими линиями показаны уровни поля в камере, когда приемный зонд с детекторной головкой устанавливался в точке 7 (на оси камеры напротив генераторного штыря). Жирными линиями показаны максимальные из сигналов, когда приемный зонд

(штыревой или петлевой) переносился в точки 4; 5; 2 и др. во внешний объем “за лайнером”. Видно, что поле за лайнером ослаблено по сравнению с полем внутри камеры примерно в 25–30 раз. Аналогичная картина была получена, когда поле внутри внешнего резонатора, возбуждаемого на его резонансных частотах, сравнивалось с полем, провисающим через отверстия в лайнере в вакуумную камеру. Добротности наблюдаемых резонансов не превосходят 1000 в указанном диапазоне частот.

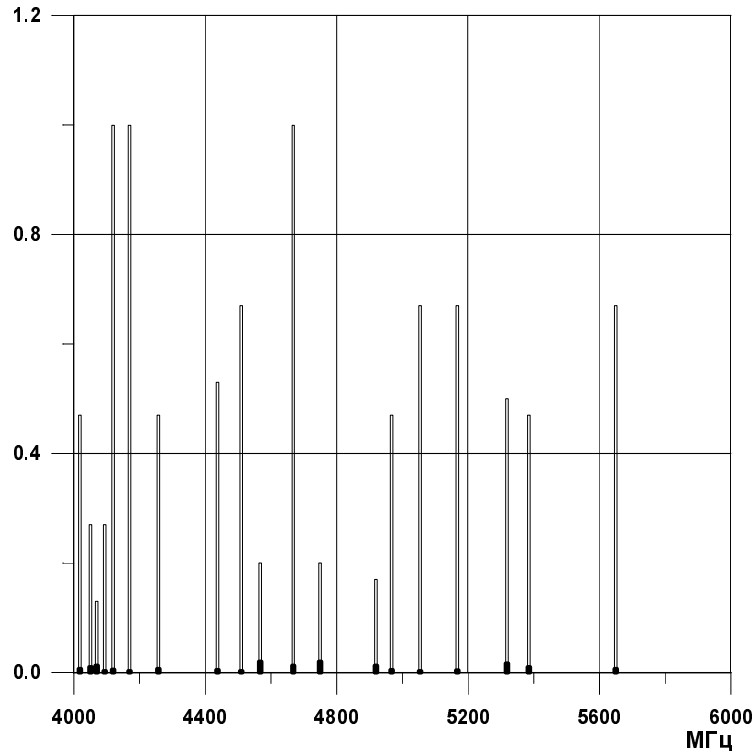


Рис. 3: Уровни поля E -волн. Жирные линии — за лайнером, тонкие — в камере.

Проведенные измерения позволяют сделать верхнюю оценку импедансов связи. В первом приближении можно считать, что внешний резонатор коаксиальный, и на его длине укладывается целое число полуволн ТЕМ колебаний. Тогда эквивалентные шунтовые сопротивления этих колебаний, соответствующие пучности электрического поля, легко рассчитываются [6] и не превосходят $R_{ш} = 2,4$ кОм для всех резонансов. Пучок взаимодействует с существенно экранированными (см. рис. 3) провисающими полями этих резонансов. Поэтому можно полагать, что он “видит” шунтовые сопротивления, не превосходящие указанную величину. Отсюда следует, что величина приведенных импедансов связи $R_{ш}/n$, где n — номер гармоники частоты обращения, не превосходит 0,008 Ом. Для суммарного числа боксов это находится на уровне порога неустойчивости [4] в диапазоне 4–6 ГГц. Если учесть экранировку полей, фактор пролетного времени ($T < 1$), несовпадение размеров и соответственно собственных частот боксов, то результирующие импедансы связи должны быть заметно ниже пороговых.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Установка лайнера приводит к существенному снижению индуктивного импеданса вакуумного бокса и устранению E -мод колебаний его цилиндрического расширения. Степень связи собственных колебаний бокса с камерой через отверстия в лайнере достаточно мала. Их импедансы связи с пучком находятся в допустимых пределах в диапазоне 4–6 МГц.

Список литературы

- [1] Куренной С.С. Взаимодействие пучка с вакуумной камерой ускорителя. Методы вычисления импеданса связи: Препринт ИФВЭ 91–158, Протвино, 1991.
- [2] Балбеков В.И., Иванов С.В. Пороги продольной неустойчивости сгруппированного пучка при наличии доминирующего индуктивного импеданса: Препринт ИФВЭ 91–14, Протвино, 1991.
- [3] Метрикин А.А. Антенны и волноводы РРЛ. — Москва, “Связь”, 1977.
- [4] Балбеков В.И., Иванов С.В. Пороги продольной неустойчивости сгруппированного пучка в протонных синхротронах: Препринт ИФВЭ 84–211, Серпухов, 1984.
- [5] Куренной С.С. Импеданс связи пучка с отверстиями в стенках вакуумной камеры ускорителя: Препринт ИФВЭ 92–84, Протвино, 1992.
- [6] Нейман М.С. Триодные и тетродные генераторы сверхвысоких частот. — Москва, “Советское Радио”, 1950.