

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО МЕХАНИЗМУ ОБРАЗОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТОКА В БЕТАТРОНЕ

О. В. СОКОЛОВ, В. Л. ЧАСТОКОЛЕНКО

(Представлена научным семинаром НИИ ЭИ)

### Введение

Во время инжекции в ускорительной камере бетатрона образуется так называемый нестационарный ток. Нестационарный ток существует в течение очень небольшого промежутка времени (0,1—1,0 мксек), однако по своей величине может в 10 и более раз превышать ток, захватываемый в режим ускорения [1—3]. В достаточно большом количестве экспериментальных работ [3—6] определялись величина нестационарного тока и ее зависимость от тока эмиссии при разных углах расходимости электронного пучка при выходе из инжектора, среднее число оборотов электронов, образующих нестационарный ток, форма сигнала от нестационарного тока, полученная с помощью какого-либо датчика. Вопрос о механизме образования нестационарного тока не исследовался, за исключением работы [7], в которой авторы исходили из упрощенной картины движения узкого электронного пучка в магнитном поле бетатрона. Исследование механизма образования нестационарного тока представляет интерес с целью выяснения возможности его захвата в режим ускорения, а также должно способствовать более глубокому пониманию процесса захвата электронов в ускорение.

Из теоретической работы [8] следует, что наиболее существенным фактором, влияющим на захват электронов в ускорение, является резонансное затухание амплитуд колебаний циркулирующих электронов при их прохождении через неоднородность в азимутальном распределении плотности пространственного заряда, создаваемую пучком электронов, выходящим из инжектора в результате его расхождения под действием собственного пространственного заряда. При исследовании механизма образования нестационарного тока мы исходили из того факта, что выходящий из инжектора в течение всего времени инжекции пучок электронов должен оказывать влияние на движение циркулирующих электронов. В связи с этим нами был проведен расчет траекторий движения электронов во время инжекции. При расчете учитывалось азимутальное изменение радиальных фокусирующих сил магнитного поля бетатрона, вызванное наличием пучка электронов, выходящего из инжектора, и его расхождением под действием собственного пространственного заряда. На рис. 1 приведены расчетные данные по характеру изменения амплитуд радиальных колебаний электронов ( $\rho$ ) в зависимости от числа оборотов электронов в ускорительной камере при различных углах вылета их из инжектора (знаки «+», «—» соответствуют вылету электронов в сторону внешней и внутренней стенок ускорительной камеры соответст-

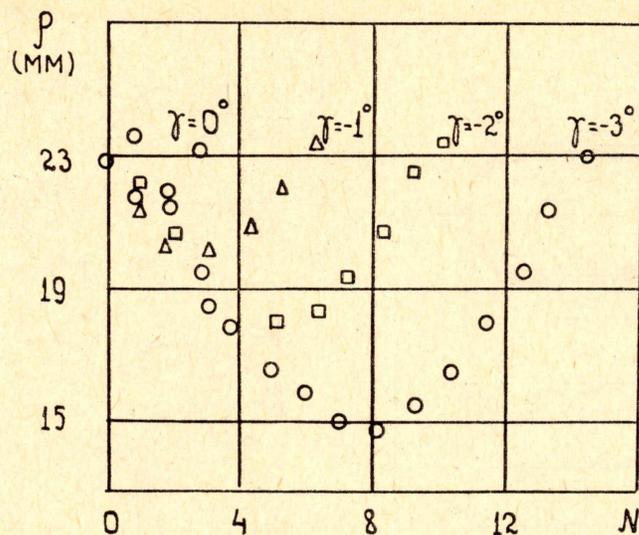


Рис. 1

венно). Видно, что для электронов, вылетевших из инжектора в интервале определенных углов, амплитуда колебаний после нескольких оборотов имеет минимальную величину, а затем вновь возрастает, т. е. образование нестационарного тока носит резонансный характер. Это означает, что при определенных условиях, когда для большей части электронов происходит уменьшение их амплитуд колебаний, должно происходить сжатие в радиальном направлении всего пучка электронов, образующих нестационарный ток. Такое явление должно происходить при образовании нестационарного тока на фронтах импульса инжекции, когда происходит однократное образование нестационарного тока. При образовании нестационарного тока на плоской вершине импульса инжекции сжатие пучка электронов в радиальном направлении не должно наблюдаться. В этом случае будет происходить многократное образование нестационарного тока, так как на протяжении длительного промежутка времени энергия электронов будет соответствовать напряженности магнитного поля бетатрона, и нестационарный ток образуется электронами, имеющими весь набор амплитуд колебаний от минимальной до максимальной. Интересно отметить, что наиболее эффективный захват электронов в ускорение наблюдается на фронтах импульса инжекции, т. е. там, где должно происходить однократное образование нестационарного тока.

Экспериментальное исследование поперечных размеров циркулирующего пучка электронов во время инжекции должно служить одним из критериев правильности суждения о механизме образования нестационарного тока.

### Результаты экспериментов

Экспериментальное исследование поведения нестационарного тока во времени производилось на бетатроне 15 Мэв с помощью электростатических электродов, расположенных в ускорительной камере, как показано на рис. 2, а. Электроды размещались на азимуте  $180^\circ$  относительно инжектора. Величина сигнала, возникающего на каждом из электродов (2, 3), будет зависеть в первую очередь от величины тока, циркулирующего в камере, от расстояния между электродом и центром пучка, а также от размера поперечного сечения пучка электронов. При этом необходимо было учитывать возможность искажения сигнала, образуе-

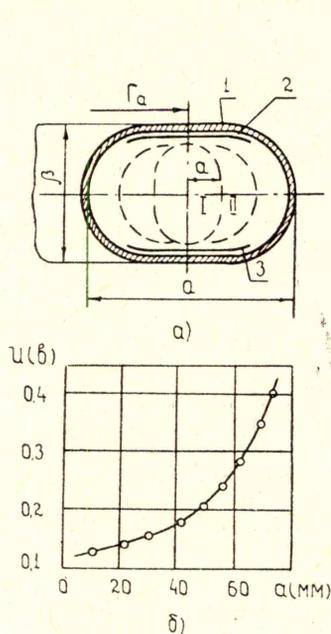


Рис. 2. 1 — ускорительная камера; 2 — 3 — электростатические электроды;  $r_a = 130$  мм;  $a = 80$  мм;  $\beta = 45$  мм

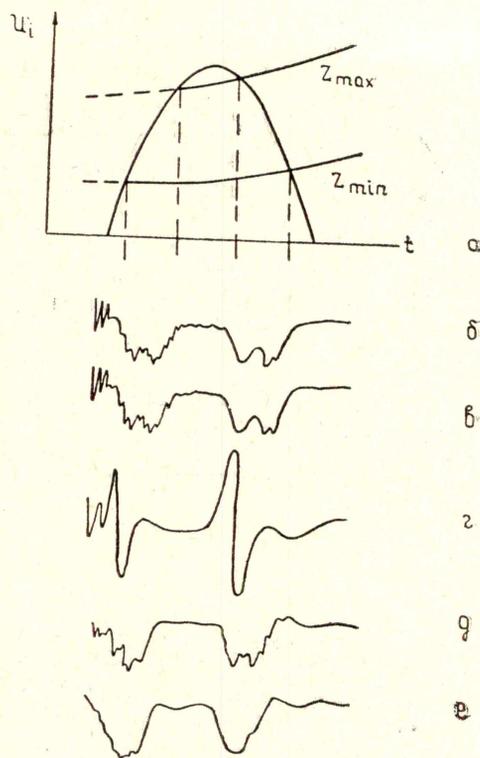


Рис. 3

мого нестационарным током, в результате непосредственного попадания электронов на электростатические электроды. Наблюдение за характером сигналов с электродов при различных токах эмиссии из инжектора с использованием экранов, установленных перед измерительными электродами для предотвращения прямого попадания на последние, электронов из инжектора [9], а также введение электродов в камеру на различные расстояния от медианной плоскости, показали, что искажения сигнала, связанные с непосредственным попаданием на них электронов, очень малы и становятся заметными лишь при больших токах эмиссии, превышающих в 2—3 раза оптимальный ток эмиссии, соответствующий максимуму излучения. Полная идентичность сигналов, снимаемых с электродов 2 и 3 (рис. 2), расположенных симметрично относительно медианной плоскости ускорителя, как это видно из осциллограмм б и в (рис. 3), свидетельствует о том, что во время существования нестационарного тока не происходит смещения центра пучка относительно электродов в вертикальном направлении.

Таким образом, в геометрии, изображенной на рис. 2, а, при постоянном циркулирующем токе величина сигнала с электродов должна зависеть от поперечного размера пучка электронов, образующих нестационарный ток.

Для калибровки сигналов с датчиков применялись металлические цилиндры эллиптического сечения, через которые пропусклся импульс тока, соответствующий величине и длительности импульса, образуемого нестационарным током. Центры сечений цилиндров находились на одном и том же расстоянии от электродов. В нашем случае при радиальной инжекции необходимо было установить соотношение между величиной сигнала, возникающего на электродах, и радиальным размером цилиндра. Поэтому изменения сечения цилиндров производились только за счет большой оси, как показано на рис. 2, а (I, II). Форма сечения предварительно устанавливалась из наблюдения пучка электронов на флуоресцирующем экране, помещенном в ускорительную камеру на ази-

муте расположения электродов. На рис. 2, б представлена зависимость величины сигнала с одного из электродов от радиального размера цилиндров. Видно, что с увеличением радиального размера цилиндра происходит возрастание величины сигнала с электродов. Эта зависимость была использована при исследовании импульсов, образуемых нестационарным током на электродах (рис. 3, б, в).

На рис. 3, а представлено такое сопряжение импульса инжекции с областью необходимого напряжения, при котором должно происходить однократное образование нестационарного тока на переднем и заднем фронтах импульса инжекции. Осциллограммы сигналов (рис. 3, б, в) сняты при напряжении инжекции 20 кв, токе эмиссии из инжектора 200 ма, длительности импульса инжекции колоколообразной формы 2,8 мсек. Для снятия осциллограмм (рис. 3, б, в) использовался скоростной двухлучевой осциллограф СИ-7. Из осциллограмм б, в (рис. 3) видно, что на вершинах импульсов, соответствующих образованию нестационарного тока, как на переднем, так и на заднем фронтах импульса инжекции имеются провалы. Сопоставление осциллограмм с градуировочной кривой (рис. 2, б) приводит к выводу, что размеры пучка электронов, образующих нестационарный ток, после нескольких оборотов уменьшаются, а затем нарастают.

На рис. 3, г представлены сигналы, создаваемые нестационарным током в магнитно-индукционном датчике, изготовленном в виде витков, уложенных на поверхности ускорительной камеры вдоль орбит электронов [9]. Положительная часть импульса соответствует нарастанию тока в камере, отрицательная часть — спаду. Из сопоставления сигналов г и б, в видно, что провалы на осциллограммах б, в соответствуют максимальной величине нестационарного тока (после интегрирования сигнала г). Следовательно, наблюдающиеся на осциллограммах б и в (рис. 3) провалы свидетельствуют о сжатии пучка электронов, а не связаны с изменением величины циркулирующего тока.

При увеличении тока эмиссии из инжектора происходит более быстрое уменьшение амплитуд колебаний электронов и столь же быстрое их возрастание в результате того, что большему току эмиссии из инжектора соответствует и большее азимутальное изменение фокусирующих сил магнитного поля бетатрона. Это ведет к значительному уменьшению среднего числа оборотов электронов, образующих нестационарный ток. В этом случае происходит многократное образование нестационарного тока. Сопоставление осциллограмм д и е (рис. 3), первая из которых снята при оптимальном токе эмиссии из инжектора, а вторая — при токе эмиссии, в 3 раза превышающем оптимальный (напряжение инжекции 8 кв), показывает, что провалы при большом токе эмиссии отсутствуют. Искажения сигналов, возникающие на переднем фронте импульсов, связаны с наличием помех от схемы инжекции.

Таким образом, резонансный механизм образования нестационарного тока подтверждается экспериментально. Поскольку захвату электронов в ускорение всегда сопутствует образование кругового нестационарного тока достаточно большой величины, то несомненна его роль в процессе захвата.

### Выводы

1. Экспериментальное исследование поведения нестационарного тока во времени показало, что в механизме его образования существенную роль играет резонансное затухание амплитуд колебаний электронов на неоднородности в азимутальном распределении плотности пространственного заряда, образуемой током эмиссии.

2. Часть электронов, образующих нестационарный ток, захватывает-

ся в режим ускорения благодаря возникновению условий необратимого изменения их амплитуд колебаний после затухания.

3. Для захвата нестационарного тока в ускорение необходимо создать условия необратимого изменения амплитуд колебаний после затухания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Коробочко. ЖТФ, **27**, 745, 1957.
  2. Д. П. Иванов, А. П. Комар, Ю. С. Коробочко. ЖТФ, **29**, 978, 1959.
  3. Д. П. Иванов, А. П. Комар, Ю. С. Коробочко. ЖТФ, **29**, 1235, 1959.
  4. О. Е. Жуков, Д. П. Иванов, Ю. С. Коробочко. ЖТФ, **38**, 1067, 1968.
  5. В. Н. Логунов, Е. П. Овчинников и др. ЖТФ, **27**, 1143, 1957.
  6. И. П. Чучалин. Изв. ТПИ, **87**, 275, 1957.
  7. Ю. Н. Лобанов, Н. И. Тулинова. ЖТФ, **31**, 194, 1961.
  8. П. А. Черданцев. Диссертация. ТПИ, Томск, 1961.
  9. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Изв. вузов СССР, «Физика», **9**, 106, 1970.
-