

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИНЖЕКЦИИ В БЕТАТРОНЕ

О. В. СОКОЛОВ, Б. Л. ЧАСТОКОЛЕНКО

(Представлена научно-исследовательским институтом  
электронной интроскопии)

Общей закономерностью для бетатронов и синхротронов с бетатронным предускорением является образование во время инжекции кругового замкнутого тока электронов большой величины.

Этот ток, часто называемый нестационарным током, по своей амплитуде в десятки и сотни раз превышает ток электронов, захватываемых в ускорение и в несколько раз может превышать по амплитуде величину тока инжекции [1—7, 11—14]. В связи с большой величиной нестационарного тока представляется интересным исследовать механизм его образования, а также попытаться создать условия для захвата его в ускорение для повышения эффективности работы бетатрона.

Образование нестационарного тока связано с захватом электронов в ускорение. Однако ни в теоретических работах, рассматривающих различные механизмы захвата электронов в ускорение, ни в экспериментальных, за исключением [10], где результаты исследования рассматриваются на основе упрощенной картины движения узкого электронного пучка в магнитном поле бетатрона, вопрос о механизме образования нестационарного тока не рассматривался. Не выяснена также причина кратковременного существования нестационарного тока, не учитывается влияние пучка электронов, выходящего из инжектора, на характер его образования.

Рассмотрение условий движения электронов в ускорительной камере во время многооборотной инжекции привело нас к заключению, что одним из существенных факторов в механизме образования нестационарного тока может быть резонансное затухание амплитуд колебаний электронов, образующих нестационарный ток. Выходящий из инжектора пучок электронов имеет определенный угол расходимости, благодаря угловому разбросу, а также под действием собственного пространственного заряда. В результате расхождения пучка плотность пространственного заряда по азимуту будет распределяться неравномерно, а это, в свою очередь, должно приводить к неравномерному азимутальному распределению действующего значения фокусирующих сил магнитного поля бетатрона. Таким образом, создаются условия для резонансного затухания колебаний циркулирующих электронов.

Проведенные нами расчеты траекторий движения электронов в 15 Мэв бетатроне во время инжекции с учетом расхождения пучка инжектированных электронов подтвердили резонансный характер про-

цесса образования нестационарного тока. В основу расчетов траекторий движения электронов было положено решение дифференциального уравнения радиальных бетатронных колебаний с учетом азимутально-го изменения величины фокусирующих сил магнитного поля:

$$\frac{d^2\rho}{d\theta^2} + [1 - n(\theta)]\rho = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  — отклонение электрона от равновесной орбиты;  
 $\theta$  — независимая переменная (азимут);  
 $n(\theta)$  — действующее значение показателя спадания магнитного поля бетатрона.  
 Значение  $n(\theta)$  можно представить как

$$n(\theta) = n_{\text{ср}} + \Delta n(\theta), \quad (2)$$

где  $n_{\text{ср}}$  — среднее значение показателя спадания магнитного поля бетатрона;

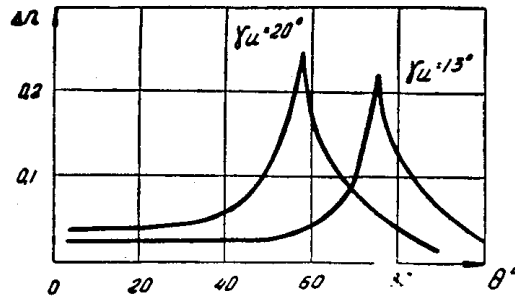


Рис. 1. Расчетные значения  $\Delta n(\theta)$  для  $\gamma_{\text{н}} = 20^\circ$  и  $\gamma_{\text{н}} = 13^\circ$

$n(\theta)$  — изменение  $n$ , связанное с током эмиссии из инжектора.

На рис. 1 представлены значения  $\Delta n(\theta)$ , полученные расчетным путем для 15 Мэв бетатрона при углах расходимости ( $\gamma_{\text{н}}$ ) инжектора  $20^\circ$  и  $13^\circ$  [9]. Решение уравнения (1) производилось методом Рунге-Кутта при помощи ЭЦВМ. На рис. 2 показана зависимость амплитуд колебаний электронов ( $\rho$ ) в зависимости от числа оборотов ( $N$ ) электронов, полученная в результате расчетов траекторий движения электронов для 15 Мэв бетатрона (напряжение инжекции  $U_{\text{и}} = 20$  кВ; ток эмиссии из инжектора  $I_{\text{эм}} = 150$  мА;  $n_{\text{ср}} = 0,66$ ;  $r_0 = 130$  мм,  $r_{\text{и}} - r_0 = 23$  мм, где  $r_{\text{и}}$  — радиус инжекции). Первоначальное уменьшение амплитуд колебаний электронов связано с тем, что условия входа электронов в неоднородность на первых оборотах являются благоприятными для затухания амплитуд колебаний, а в дальнейшем, в результате изменения фазы входа электронов в неоднородность, происходит резонансное воз-

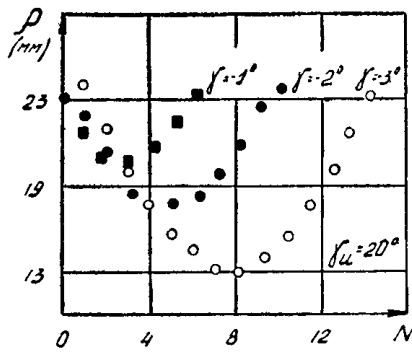


Рис. 2. Изменение амплитуд колебаний электронов ( $\rho$ ) в зависимости от азимута или числа оборотов электронов ( $N$ ) в ускорительной камере

растание амплитуд колебаний электронов.

На рис. 3 представлены зависимости числа оборотов электронов ( $N$ ), образующих нестационарный ток, от угла вылета электронов ( $\gamma$ )

из инжектора при углах расходимости ( $\gamma_{и}$ ) инжекторов  $20^\circ$  и  $13^\circ$ . Из этих зависимостей можно найти среднее число оборотов электронов, образующих нестационарный ток, и, принимая, что плотность электронов по сечению инжектированного пучка распределена равномерно, определить величину нестационарного тока по формуле

$$I_{н} = \frac{\gamma_{и}}{\gamma_{и}} I_{эм} \cdot \bar{N}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{и}$  — интервал углов вылета электронов, образующих нестационарный ток;

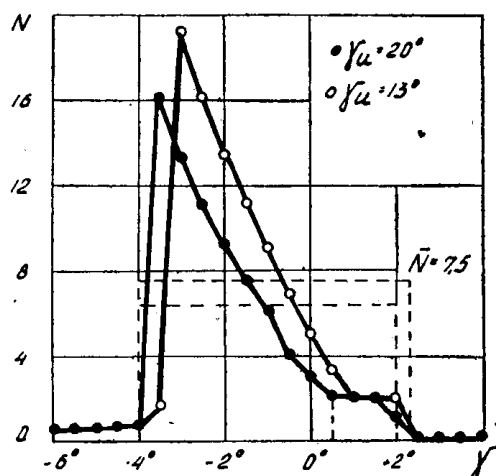


Рис. 3. Зависимость числа оборотов электронов ( $N$ ) от угла вылета электронов ( $\gamma$ ) из инжектора

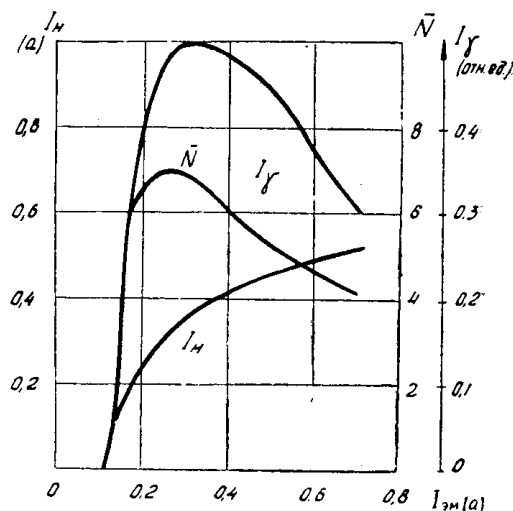


Рис. 4. Зависимости  $I_{н}$ ,  $N$  и  $I_{\gamma}$  от тока эмиссии из инжектора ( $I_{эм}$ ) при  $\gamma_{и} = 20^\circ$ ,  $U_i = 20$  кВ

$\gamma_{и}$  — угол расходимости электронного пучка при выходе из инжектора;

$\bar{N}$  — среднее число оборотов электронов, образующих нестационарный ток;

$I_{эм}$  — ток эмиссии из инжектора.

После подстановки в (3) всех необходимых величин было найдено, что при  $U_i = 20$  кВ,  $I_{н} = 290$  ма для  $\gamma_{и} = 20^\circ$  и  $I_{н} = 520$  ма при  $\gamma_{и} = 13^\circ$ . Экспериментальные измерения величины нестационарного тока, циркулирующего в 15 МэВ бетатроне при  $U_i = 20$  кВ, дали значения 340 и 600 ма соответственно при  $\gamma_{и} = 20^\circ$  и  $\gamma_{и} = 13^\circ$ .

На рис. 4 и 5 представлены зависимости нестационарного тока ( $I_{н}$ ) от тока эмиссии из инжектора ( $I_{эм}$ ), снятые при  $\gamma_{и} = 20^\circ$ , причем для сопоставления на рис. 4 приведены также зависимости интенсивности тормозного рентгеновского излучения ( $I_{\gamma}$ ) и среднего числа оборотов электронов, образующих нестационарный ток ( $\bar{N}$ ) при одних и тех же параметрах инжекции, а рис. 5 включает зависимости нестационарного тока от напряжения инжекции ( $U_i$ ).

Видно, что вначале с увеличением тока эмиссии из инжектора происходит быстрое нарастание нестационарного тока, затем скорость нарастания уменьшается и его величина приближается к некоторой предельной ( $I_{н, пред.}$ ), определяемой величиной напряжения инжекции ( $U_i$ ). Сопоставляя кривые  $I_{н}$  и  $\bar{N}$  (рис. 4), видим, что быстрому возрастанию нестационарного тока соответствует увеличение среднего числа оборо-

тов электронов, образующих нестационарный ток, причем наибольшему значению  $\bar{N}$  соответствует максимальная интенсивность тормозного излучения бетатрона ( $I_\gamma$ ). При дальнейшем увеличении тока эмиссии из инжектора ( $I_{эм}$ ) происходит уменьшение  $\bar{N}$  и медленное нарастание нестационарного тока обусловлено увеличением числа электронов на оборот за счет увеличения  $I_{эм}$ . Обращает на себя внимание тот факт, что возникновение нестационарного тока начинается при определенном пороговом токе эмиссии из инжектора, а наибольшие значения  $\bar{N}$  и  $I_\gamma$  соответствуют другой величине тока эмиссии. Это является экспериментальным подтверждением того, что решающую роль в процессе образования нестационарного тока играет наличие пространственного заряда определенной величины, создаваемого током эмиссии из инжектора. Резонансный характер механизма образования нестационарного тока подтверждается также экстремальным характером кривых  $\bar{N}$  и  $I_\gamma$  (рис. 4) и зависимостями рис. 5, которые показывают, что при увеличении энергии инжектируемых электронов необходим больший ток эмиссии для образования нестационарного тока.

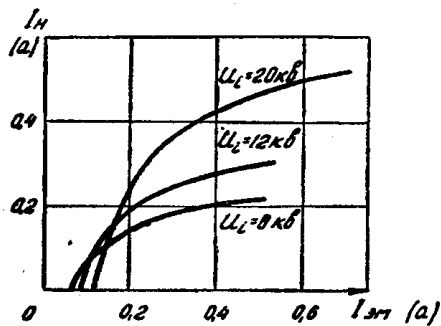


Рис. 5. Зависимости  $I_n$  от тока эмиссии из инжектора ( $I_{эм}$ ) при различных  $U_i$ .

При исследовании нестационарного тока представляет интерес рассмотреть возможность влияния на его распад таких факторов, действие которых могло бы полностью или частично исключить возможность его захвата в режим ускорения. В связи с этим исследовалось влияние на распад нестационарного тока резонансов бетатронных колебаний, а также продольной и поперечной неустойчивости пучка электронов во время инжекции. Расчеты показали, что под действием пространственного заряда нестационарного тока происходит такое изменение относительных частот вертикальных и радиальных колебаний, при котором выполняются условия для возникновения резонансов бетатронных колебаний. Уменьшение величины нестационарного тока из-за резонансов бетатронных колебаний согласно экспериментам составляло 10—15% от его максимальной величины, т. е. резонансы бетатронных колебаний не могут быть причиной распада нестационарного тока. Проведенные нами расчеты и эксперименты показывают, что поперечная неустойчивость пучка во время существования нестационарного тока при имеющихся параметрах инжекции не наступает. Продольная неустойчивость имеет постоянную времени  $\approx 630$  мксек, поэтому ее влияние также можно исключить.

Моделирование процессов в камере с учетом неоднородности, создаваемой пучком, с учетом дефокусирующего действия тороидального пространственного заряда электронов нестационарного тока, а также с учетом изменения этих величин во времени свидетельствует о том, что в основе механизма захвата также, как и в основе механизма образования нестационарного тока, лежит резонансное затухание амплитуд колебаний электронов.

Моделирование процесса образования нестационарного тока с помощью ЭЦВМ показывает, что при существующих значениях неоднородности  $\Delta n(\theta)$ , создаваемой током эмиссии из инжектора, ее наличие са-

мо по себе не приводит к необратимому уменьшению амплитуд колебаний электронов, т. е. к захвату электронов в ускорение. С общей теоретической точки зрения для создания условий для окончательного захвата электронов необходимо каким-то образом изменить во времени условия движения электронов либо за счет изменения фокусирующего магнитного поля, либо за счет изменения электрического впускного поля.

Такие условия, как следует из расчетов, возникают в двух случаях:

1. При быстром уменьшении во времени величины нестационарного тока (т. е. в результате быстрого исчезновения тороидального пространственного заряда, вносившего дефокусировку).

2. При быстром уменьшении во времени неоднородности  $\Delta n(\theta)$ , создаваемой пучком за время порядка нескольких наносекунд (т. е. в результате исчезновения причины резонансного роста амплитуд колебаний электронов после затухания).

Первый механизм, связанный с существованием и быстрым исчезновением электронов нестационарного тока, по-видимому, является обычным механизмом захвата в бетатроне, характеризующийся малой эффективностью. Таким образом, в результате накопления нестационарного тока и быстрого его исчезновения возникают условия для захвата в ускорение малой доли электронов его составляющих (3—5%).

Другой механизм захвата, не связанный с потерей электронов нестационарного тока и возникающий при быстром исчезновении неоднородности, создаваемой пучком, т. е. при быстром прерывании тока эмиссии из инжектора, должен обладать большей эффективностью. При идеальной точности синхронизации и стабилизации импульса инжекции с крутизной фронтов порядка нескольких наносекунд, как следует из расчетов, можно захватить в ускорение до 30% электронов нестационарного тока, т. е.  $\sim$  в 4—5 раз повысить эффективность захвата электронов в ускорение.

Нами была экспериментально проверена возможность повышения числа ускоренных электронов при инжекции импульсами с резким обрывом заднего фронта. Следует отметить, что при создании импульсов инжекции с длительностью заднего фронта  $10^{-9}$  сек и точности синхронизации порядка  $10^{-9}$  сек при частоте повторения импульсов 50 гц имеются значительные трудности. При экспериментальном исследовании захвата нестационарного тока нами применялся импульс инжекции с амплитудой 20 кВ и крутизной заднего фронта  $2,5 \cdot 10^{-8}$  сек. При этом захваченный ток составлял в отдельных случаях 23—25 мА, в то время как при синусоидальном импульсе приблизительно той же длительности и при том же напряжении захваченный ток не превышает 14 мА. Оценка нестабильности фазы инжекции дала значение 5,5%, т. е. точность синхронизации при проведении эксперимента находилась в пределах до  $1,8 \cdot 10^{-6}$  сек. Для уменьшения нестабильности нами были проведены эксперименты по захвату нестационарного тока в ускорение при питании электромагнита бетатрона постоянным током. Нестабильность в этом случае оценивалась значением 0,75%, т. е. точность синхронизации находилась в пределах  $2,4 \cdot 10^{-7}$  сек. Величина захваченного в ускорение тока составила 33 мА. Измерения захваченного тока в том

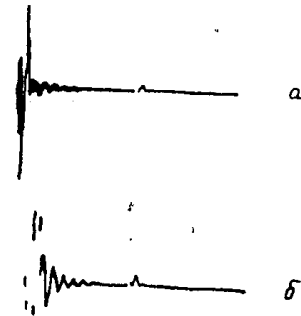


Рис. 6. Осциллограммы нестационарного тока (первый импульс) и тока электронов, захваченных в ускорение (второй импульс): а) при обычном импульсе инжекции; б) при импульсе инжекции с крутым задним фронтом

и другом случае производилась с помощью магнитно-индукционного датчика в виде витков, расположенных на ускорительной камере вдоль орбит электронов и создания электрического поля в ускорительной камере для прерывания циркулирующего тока [8].

На рис. 6 показаны осциллограммы измеренных нестационарного и захваченного в ускорение тока (первый импульс соответствует нестационарному току, второй — захваченному в ускорение):

- а) при обычном синусоидальном импульсе инжекции;
- б) при импульсе инжекции с крутым задним фронтом [13—14].

Итак, экспериментально подтверждается возможность захвата части нестационарного тока в режим ускорения. Для достижения большей эффективности необходимо создать более точные условия синхронизации и обеспечить большую крутизну заднего фронта импульса инжекции.

### Выводы

1. Образование нестационарного тока происходит в результате накопления в ускорительной камере электронов, инжектированных в различные моменты времени, имеющих малые амплитуды колебаний и совершающих более одного оборота в ускорительной камере. Появление же электронов, имеющих малые амплитуды колебаний и совершающих достаточно большое число оборотов, происходит в результате «резонансного» взаимодействия циркулирующих электронов с током эмиссии из инжектора.

2. В результате быстрого исчезновения нестационарного тока создаются условия для захвата в ускорение некоторой малой части электронов его составляющих (3—5%).

3. Выяснена возможность осуществления более эффективного механизма захвата, не связанного с потерей электронов нестационарного тока и возникающего при быстром обрыве тока инжекции.

4. Другим способом повышения числа ускоряемых электронов может быть отказ от многооборотной инжекции с присущим ей резонансным механизмом и осуществление, например, однооборотного бесколебательного ввода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Ящук. Атомная энергия. 8, 150, 1960.
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, 256, 1957.
7. И. М. Голошапов. Изв. ТПИ, 87, 275, 1957.
8. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Изв. вузов СССР, «Физика», 9, 106, 1970.
9. О. В. Соколов. Диссертация. Томск, 1964.
10. Ю. Н. Лобапов, Н. И. Тулинова. ЖТФ, 31, 194, 1961.
11. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Изв. вузов СССР, «Физика», 7, 83, 1971.
12. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Труды VII межвузовской конференции по электронным ускорителям. Вып. 2, 13. М., Атомиздат, 1970.
13. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по использованию ускорителей в народном хозяйстве и медицине. Доклад 048, Ленинград, 1971.
14. Б. Л. Частоколенко. Диссертация. Томск, 1971.