

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТОКА В БЕТАТРОНЕ

О. В. СОКОЛОВ, Б. А. ЧАСТОКОЛЕНКО

(Представлена научным семинаром НИИ ЭИ)

Во время инъекции электронов в ускорительной камере бетатрона создаются условия для кратковременного циркулирования тока большой величины, названного нестационарным. Его величина во много раз больше величины тока, захватываемого в режим ускорения. Так, например, из [1, 2] следует, что величина тока, захватываемого в режим ускорения, составляет 1—10% от нестационарного тока. В 15 МэВ бетатроне ТПИ при напряжении инъекции 20 кВ нестационарный ток составляет 300 мА, в то время как захваченный в ускорение ток имеет величину порядка 15 мА. В связи с этим исследование нестационарного тока представляется интересным как для выяснения природы его образования, так и для создания условий для захвата его в режим ускорения.

К настоящему времени в ряде работ [1—7] имеются сведения о величине и времени существования нестационарного тока, о зависимости нестационарного тока от тока эмиссии из инжектора и угла расхождения электронного пучка при выходе из инжектора, о среднем числе оборотов электронов, образующих нестационарный ток, об образовании нестационарного тока при питании электромагнита бетатрона постоянным током.

Однако имеющиеся в литературе данные не дают представления о закономерностях образования нестационарного тока.

В работах [9, 11—14] дан механизм образования нестационарного тока, основанный на «резонансном» взаимодействии циркулирующих электронов с током эмиссии из инжектора и показана возможность захвата в ускорение части электронов нестационарного тока и повышения на этой основе интенсивности пучка ускоряемых электронов в 5 и более раз. Приведенные в указанных работах результаты моделирования с помощью ЭЦВМ процесса образования нестационарного тока в 15 МэВ бетатроне при различных параметрах инъекции и магнитного поля доведены до численных результатов и позволяют провести сравнение с результатами экспериментов.

Качественное и количественное согласие результатов экспериментов с результатами моделирования процесса образования нестационарного тока может служить критерием правильности «резонансного» механизма его образования.

В данной работе приводятся новые данные, полученные при экспериментальном исследовании нестационарного тока в бетатроне, подтверждающие «резонансный» механизм его образования.

Методика измерений

Исследование нестационарного тока имеет ряд трудностей, связанных, главным образом, с малым временем его существования (0,2—1,0 мксек), малой величиной сигнала, создаваемого им в датчике, а также с наличием помех, создаваемых схемами управления бетатрона во время измерений. Измерения нестационарного тока производились при помощи магнитно-индукционного датчика в виде 8 витков, уложенных на поверхности ускорительной камеры вдоль орбит электронов. Датчик имел чувствительность 12 мВ/мА и был прокалиброван по току электронов, совершивших один оборот в ускорительной камере, после которого они попадали на заслонку, перекрывающую все сечение ускорительной камеры. Характеристики датчика и способ калибровки приведены в работе [8]. Чувствительность такого датчика примерно на порядок превышает чувствительность датчика в виде магнитного пояса. Это позволяет подавать сигнал с датчика непосредственно на вход осциллографа без дополнительного усиления и, таким образом, существенно упрощает методику измерений по сравнению с применявшейся в работе [3].

В отличие от [3], где определялось среднее число оборотов электронов, образующих нестационарный ток в виде отношения амплитуды нестационарного тока к току эмиссии из инжектора, что приводило к определенным искажениям результатов измерений, особенно в области малых токов эмиссии из инжектора, нами введено отношение $\bar{N} = \frac{I_H}{I_1}$,

где I_H — амплитуда нестационарного тока, измеренного при помощи датчика,

а I_1 — амплитуда тока, образуемого электронами на заслонке [8] после совершения ими одного оборота.

На рис. 1 представлены зависимости I_H и I_1 (кривые 1 и 4 соответственно) от тока эмиссии из инжектора ($I_{эм}$) и построенная по ним зависимость \bar{N} от $I_{эм}$ (кривая 3).

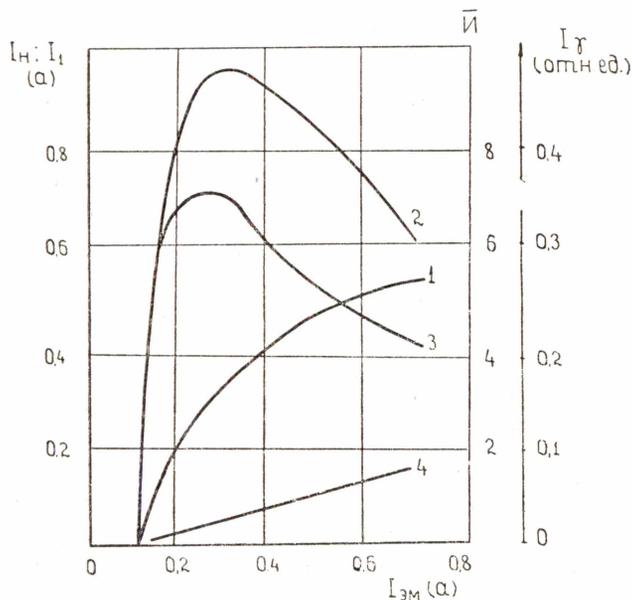


Рис. 1. 1 — I_H ; 2 — I_γ ; 3 — \bar{N} ; 4 — I_1
($U_1 = 20$ кВ)

Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены зависимости нестационарного тока (I_n) от тока эмиссии из инжектора ($I_{эм}$), причем для сопоставления на рис. 1 приведены также зависимости интенсивности тормозного рентгеновского излучения (I_γ) и среднего числа оборотов электронов, образующих нестационарный ток (\bar{N}) (кривые 2 и 3 соответственно) при одних и тех же параметрах инжекции; рис. 2 включает зависимости нестационарно-

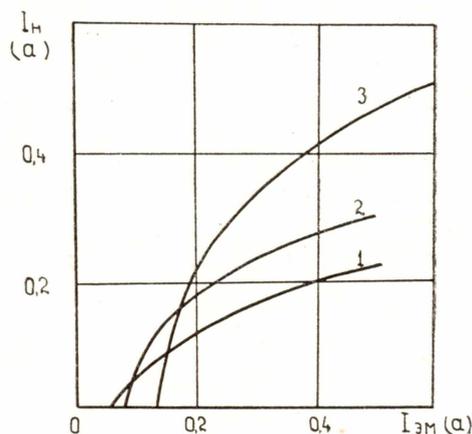


Рис. 2. 1 — $U_1=8$ кВ; 2 — $U_1=12$ кВ; 3 — $U_1=20$ кВ

го тока от напряжения инжекции. 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_1 . Сопоставляя кривые 1, 2 и 3 (рис. 1), видим, что быстрому возрастанию нестационарного тока соответствует увеличение среднего числа оборотов электронов, образующих нестационарный ток \bar{N} , причем наибольшему значению \bar{N} соответствует максимальная интенсивность тормозного излучения бетатрона I_γ .

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 $I_{эм.0}$, а наибольшие значения \bar{N} и I_γ достигают при другой величине тока эмиссии $I_{эм.опт}$. Это говорит о том, что решающую роль в процессе образования нестационарного тока играет наличие пространственного заряда определенной величины, создаваемого током эмиссии из инжектора.

Экстремальный характер кривых 2 и 3 (рис. 1) свидетельствует о резонансном характере взаимодействия циркулирующего тока с током эмиссии из инжектора. Резонансный характер механизма образования нестационарного тока подтверждается зависимостями рис. 2, которые показывают, что при увеличении энергии инжектируемых электронов необходим больший ток эмиссии из инжектора для образования нестационарного тока. С точки зрения резонансного механизма [11—14], образование нестационарного тока должно происходить благодаря затуханию колебаний некоторой части инжектированных электронов в результате азимутального измерения фокусирующих сил магнитного поля за счет неоднородного распределения плотности пространственного заряда. Увеличение энергии инжектируемых электронов должно сопровождаться

увеличением энергии колебаний. поэтому для затухания колебаний электронов требуется большая величина пространственного заряда.

Отсутствие кратности между периодом обращения электронов и периодом их колебаний приводит к изменению условий входа электронов в неоднородность, создаваемую пучком электронов, выходящим из инжектора. В результате резонансное затухание сменяется резонансным ростом амплитуд колебаний электронов, что приводит к потере большей части циркулирующих электронов после нескольких оборотов. Этим можно объяснить короткое время существования нестационарного тока и его зависимость от величины, азимутального положения, протяженности и времени существования неоднородности, создаваемой током эмиссии из инжектора.

В зависимости от угла расходимости электронного пучка при выходе из инжектора изменяется протяженность неоднородности в создаваемом им азимутальном распределении плотности пространственного заряда [9, 12]. На рис. 3, а представлена зависимость нестационарного тока I_n от тока эмиссии инжектора $I_{эм}$ при различных углах расходимости инжектора γ_u . Для сопоставления приводится зависимость интенсив-

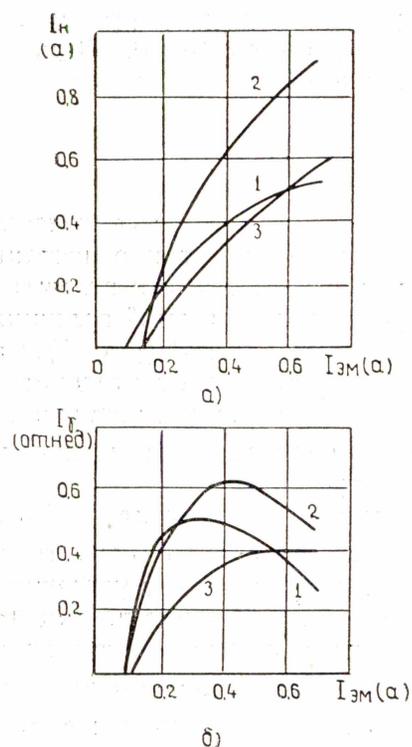


Рис. 3. 1 — $\gamma_u = 20^\circ$; 2 — $\gamma_u = 13^\circ$; 3 — $\gamma_u = 5^\circ$ ($U_1 = 20$ кВ)

ности тормозного излучения I_γ от $I_{эм}$ (рис. 3, б). Видно, что наибольшие величины нестационарного тока и интенсивности тормозного излучения наблюдаются при угле расходимости 13° .

В таблице представлены значения величин $I_{эм,0}$ (пороговое значение тока эмиссии из инжектора), $I_{эм,опт}$ (значение тока эмиссии, соответствующее максимуму излучения), $I_{н,опт}$ (величина нестационарного тока, циркулирующего при $I_{эм,опт}$), $I_{н,пред}$ (предельная величина нестационарного тока) и I_γ (максимальная интенсивность излучения бетатрона) для разных напряжений инжекции U_1 и длительности импульса инжекции τ_i . Форма импульса инжекции колоколообразная. Величины, отмеченные звездочкой, взяты для сравнения из работы [10]. Из таблицы видно, что уменьшение длительности импульса инжекции, которое должно

Таблица

U_1 , кВ	$\tau_{н}$, мксек	$I_{эм.о.}$, мА	$I_{эм.опт.}$, мА	$I_{н.опт.}$, мА	$I_{н.пред.}$, мА	$I_{н}$, отн. ед.
8,5	1	95	240	180	400	0,31
	3	60	180	125	230	0,25
	6	30	110	85	220	0,29
12	1	110	360	310	600	0,42
	3	75	190	170	350	0,35
	6	40	125	160	310	0,38
22	3	100	320	380	800	0,54
	6	50	200	350	720	0,49
30	1,5 *	—	600 *	—	—	1,8 *
	15,0 *	—	150 *	—	—	1,3 *

приводить к уменьшению времени существования неоднородности, создаваемой током эмиссии из инжектора, и к увеличению скорости ее изменения, приводит к возрастанию порогового значения тока эмиссии из инжектора $I_{эм.о.}$, а также к увеличению нестационарного тока.

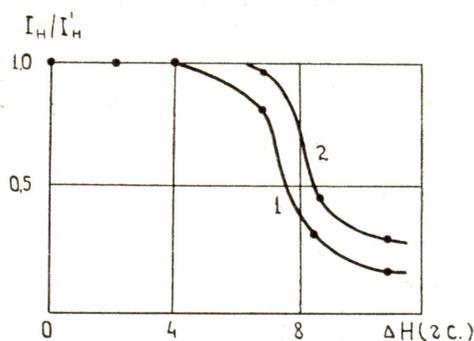


Рис. 4. 1 — $U_1 = 12$ кВ; 2 — $U_1 = 22$ кВ

На рис. 4 представлена зависимость величины $\frac{I_n}{I_n'}$ от амплитуды первой гармоники фазовой неоднородности магнитного поля бетатрона ΔH . Здесь I_n' — величина нестационарного тока при $\Delta H = 0$ (питание электромагнита бетатрона осуществлялось постоянным током), а I_n — величина нестационарного тока, измеренная при оптимальном значении тока эмиссии из инжектора $I_{эм.опт}$ для разных ΔH .

Из рис. 4 видно, что при U_1 12—22 кВ резкое уменьшение величины нестационарного тока наступает при $\Delta H > 7-8$ гаусс. Было замечено, что захват электронов в ускорение еще происходит, если $I_n / I_n' > 0,25$, чему соответствует $\bar{N} > 1,4$. С увеличением амплитуды фазовой неоднородности магнитного поля возрастает $I_{эм.о}$ и $I_{эм.опт}$, т. е. и в этом случае существенную роль играет величина неоднородности в распределении плотности пространственного заряда, создаваемого током эмиссии из инжектора.

Из рис. 1 и 3 видно, что оптимальному току эмиссии из инжектора, соответствующему максимуму излучения бетатрона при угле расходимости пучка из инжектора $\gamma_{и} = 20^\circ$ соответствует величина нестационарного тока $I_n = 340$ мА, а среднее число оборотов электронов $\bar{N} \approx 6$, при $\gamma_{и} = 13^\circ$ — $I_n = 600$ мА, при $\gamma_{и} = 5^\circ$ — $I_n = 330$ мА. По результа-

там расчетов с помощью ЭЦВМ (при $U_1=20$ кВ, $I_{эм}=200$ мА) нестационарный ток (I_n) и \bar{N} имеют следующие величины: $I_n = 380$ мА, $\bar{N} = 6,4$ (при $\gamma_{и} = 20^\circ$); $I_n = 630$ мА, $\bar{N} = 7,5$ (при $\gamma_{и} = 13^\circ$); $I_n = 380$ мА, $\bar{N} = 1,9$ (при $\gamma_{и} = 5^\circ$) [12—14]. Таким образом, имеется не только качественное, но и количественное соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Заключение

Изучение характера закономерностей образования нестационарного тока приводит к выводу, что существенную роль в механизме образования нестационарного тока играет взаимодействие циркулирующих электронов с током эмиссии из инжектора. Экстремальный характер зависимостей (последняя величина пропорциональна току, захваченному в режим ускорения), малое время существования нестационарного тока, а также согласие экспериментальных результатов с результатами, полученными при расчетах на ЭЦВМ, исходя из гипотезы резонансного образования нестационарного тока, подтверждает «резонансный» механизм этого взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Яшуков. 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. Известия ТПИ, 87, 256, 1957.
7. Н. М. Голошанов. Известия 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. В. П. Яшуков. ЖТФ, 28, 1363, 1958.
11. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Электронные ускорители. Сб. работ VII межвузовской конференции, вып. 2, Атомиздат, 1970, стр. 13.
12. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Изв. вузов СССР, «Физика», 7, 83, 1971.
13. О. В. Соколов, Б. Л. Частоколенко. Доклад 48, Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по использованию ускорителей в народном хозяйстве и медицине. Л., 1971.
14. Б. Л. Частоколенко. Диссертация, Томск, 1970.