

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ В МНОГОСЕКЦИОННЫХ
ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ

В.В.Калашников, М.Л.Пальмская, В.В.Петренко

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва

Разработанные численные методы моделирования динамики интенсивных пучков, собственные поля которых сравнимы по величине с внешними полями, позволили подробно изучить продольную динамику таких пучков [1-3] и оценить влияние вихревых и потенциальных составляющих полей пучков на их радиальные размеры [4-5]. Привлечение методов математического моделирования к изучению экспериментально наблюдаемых зависимостей параметров пучков от различных параметров сил, действующих на пучки в процессе их формирования и ускорения, дает возможность свести его к изучению отдельных эффектов и на основе анализа полученных результатов найти пути усиления или уменьшения проявления их влияния. Такой подход также позволяет подойти к решению обратной задачи, заключающейся в нахождении по требуемым выходным параметрам пучков их начальных параметров и необходимых распределений внешних магнитных полей. Согласование фазовых объемов пучков с аксептансами ЛУЭ, особенно на средние энергии, следует рассматривать в шестимерном фазовом пространстве, что обусловлено большими фазовыми и энергетическими спектрами частиц и, следовательно, взаимным влиянием продольного и поперечного движений. С этих позиций в данной работе рассмотрены некоторые результаты исследования деформации поперечного фазового объема пучка с током в импульсе несколько ампер в стационарном режиме работы ускорителя "Факел" [6-7]. Радиальная динамика рассматривалась на участках ускорителя: электронная пушка - волноводный группирователь, волноводный группирователь и участок с регулярными ускоряющими волноводами. На каждом из этих участков определены причины ограничения тока и оптимальные условия работы.

Наличие первого участка, включающего в себя фокусирующие линзы, инфлектор для формирования импульсов наносекундной длительности и коллиматор, обусловлено работой ускорителя в двух режимах: в переходном и стационарном. Первоочередной задачей на этом участке является транспортировка пучка от источника до волноводного группирователя с минимальным уменьшением яркости пучка и согласование его эмиттанса с аксептансом группирователя. При изучении динамики использовалось понятие среднеквадратического эмиттанса пучка, определяемого через среднеквадратические параметры ансамбля частиц $E = 16(\bar{g}^2 \bar{g}'^2 - \bar{g}\bar{g}')$, где \bar{g} - радиальное отклонение частиц от оси. Изменение удвоенного среднеквадратического отклонения частиц ($R^2 = 4\bar{g}^2$) - радиуса пучка при однородном распределении частиц в поперечном сечении описывается линеаризованным уравнением [8]:

$$R'' - \frac{E^2}{R^3} + \frac{2B\bar{g}}{3U} R - \frac{I}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{3}\bar{g} U^{3/2} R} = 0, \quad (I)$$

где eU - энергия инъекции частиц непрерывного пучка с током I , \bar{g} - отношение заряда к массе электрона. Исходя из уравнения (I), можно оценить величину тока, пропускаемого каналом, и оптимальные режимы фокусирующих элементов. Учет влияния собственных полей пучка в самосогласованном случае произволовлся с помощью метода "крупных" частиц, реализованного в программе [4]. Без учета вихревых полей, так как на этом участке они пренебрежимо малы, эта программа применялась для уточнения выбранной оптической схемы.

Как показал анализ результатов моделирования, огибающие пучка, соответствующие максимальному токопрохождению при разных величинах тока, имеют два максимума, главный из которых приходится на вторую линзу рассматриваемого участка, расположенную посередине между пушкой и коллиматором. С увеличением тока пучка его размер в максимуме огибающей и на выходе участка увеличивается. Так, при токе 1 А радиус пучка в кроссовере на входе в группирователь составляет 3 мм (1,6 мм), при 3 А - 4,7 мм (1,9 мм), при 5 А - 5,2 мм (2,2 мм). В скобках указана величина среднеквадратического отклонения. С увеличением тока пучка лисперсия распределения частиц по отклонениям от оси увеличивается, вид же распределения не изменяется. Обеспечить кроссовер пучка на входе в группирователь, где сильно краевое поле его соленоида, удается только при полях соленоида порядка 900 З. При меньшей величине поля соленоида пучок расходящийся и его радиус больше, чем в кроссовере.

Изучение изменения фазового объема пучка на участке инжекции показало, что для данной его структуры существует характерная фазовая плотность транспортируемых пучков P_0 . При транспортировке пучков на рассматриваемом участке с фазовой плотностью меньше P_0 их фазовая плотность линейно следует за изменением фазовой плотности инжектируемого пучка, а выше P_0 эта зависимость существенно отличается от линейного закона (см. рис. I). В последнем случае фазовая плотность транспортируемых пучков, оставаясь выше P_0 , по длине участка уменьшается и к его концу приближается к P_0 . Фазовая плотность P_0 с увеличением длины канала уменьшается. Изменения эмиттансов пучка по длине участка имеют колебательный с затуханием характер. Такое поведение фазовой плотности пучков при их транспортировке в оптических каналах можно объяснить увеличением эмиттансов пучков вследствие кулоновского взаимодействия:

$$E^2 = E_0^2 + \frac{\Lambda}{4} \int_0^L \rho^2 F dz,$$

где F - параметр, зависящий от распределения частиц, Λ - кулоновский параметр, пропорциональный коэффициенту при члене $1/R$ уравнения (I). Из полученных результатов следует, что для создания больших токов с качественными параметрами пучков в интенсивных ускорителях, где имеется довольно протяженный участок между электронной пушкой и группирователем, не всегда эффективно повышение фазовой плотности пучка источника электронов, например, за счет использования электронной пушки с почти "точечным" катодом [9]. Эта мера принесет наибольшую эффективность в случаях, если фазовая плотность частиц источника электронов будет меньше P_0 или если источник электронов с малым фазовым объемом пучка будет расположен непосредственно на входе в группирователь.

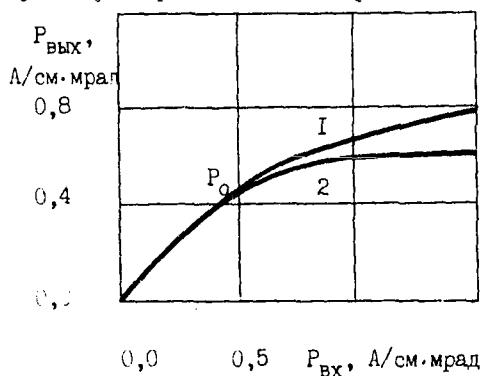


Рис. I. Зависимость фазовой плотности частиц на коллиматоре (I) и на входе в группирователь (2) от фазовой плотности частиц на входе канала инжекции.

Эмиттанс пучка на выходе группирователя в значительной мере связан с радиусом пучка на его входе [10]. Моделирование радиальной динамики пучка на волноводном группирователе показало, что радиальный размер пучка на его выходе периодически меняется с изменением величины магнитного поля соленоида, особенно если это изменение поля имеет место на участках группирователя, где фазовая скорость волны ускоряющего поля меньше скорости света. С увеличением поля соленоида размах изменения радиуса пучка уменьшается, стремясь к его средней, медленно увеличивающейся величине. Эти изменения носят синусоидальный характер, что объясняется изменением набега фазы радиальных колебаний в продольном магнитном поле [11]. Пучок при этом остается всегда расходящимся, что вносит определенные трудности в согласование его эмиттанса с аксептансом ускорителя. Увеличение же тока инжекции в группирователь проявляется в изменении ориентации эмиттанса пучка и уменьшении средней энергии частиц, что приводит к дополнительному увеличению эмиттанса пучка на регулярной части ускорителя. С увеличением радиуса инжектируемого пучка коэффициент увеличения эмиттанса пучка группирователя увеличивается. При некоторых его значениях эмиттансы ориентируются таким образом, что они уже не вписываются в аксептанс ускорителя, и зависимость тока ускорителя от величины поля соленоида становится тоже синусоидальной. Оптимальными значениями магнитного поля соленоида группирователя следует считать поля 700 и 900 Э, соответствующие условиям получения максимального тока ускорителя, который с увеличением поля соленоида всегда имеет тенденцию к уменьшению вследствие медленного роста среднего радиуса пучка.

Пропускная способность основной части ЛУЭ "Факел", состоящей из пяти регулярных однотипных ускоряющих секций, определяется числом и фокусирующей силой лублетов квадрупольных линз, которые могут быть при необходимости размещены после каждой секции ускорителя. Как показал анализ результатов моделирования динамики пучка на данном участке ускорителя, периодическая фокусирующая система ограниченной протяженности имеет различную пропускную способность в поперечных фазовых плоскостях. Поэтому в качестве аксептанса основной части ускорителя на фазовой плоскости $R'R'$ было выбрано геометрическое место представляющих точек частиц, радиальное движение которых не приводит к их потерям хотя бы в одной плоскости. Было показано, что при увеличении фокусирующего поля линз аксептанс ускорителя увеличивается, и его максимум достигается в случае, когда величина набега фазы радиальных колебаний составляет $45 - 90^\circ$ на периоде фокусировки. Дальнейшее увеличение поля квадрупольных линз приводит к резкому уменьшению аксептанса ускорителя. Так, при проектном размещении линз [6] после I, 3 и 5 секций ускорителя, величина аксептанса увеличивается всего только на 30%, но преимуществом этого канала является то обстоятельство, что согласованным с аксептансом ускорителя является в этом случае эмиттанс расходящегося пучка, что реально и имеет место после группирователя. На рисунке 2 показаны расчетные зависимости тока ускорителя от тока инжекции с различными радиусами пучка, имеющего на входе в группирователь кроссовер. Эти зависимости приведены для случая одинаковых условий фокусировки пучка на группирователе и оптимальных перестраиваемых условий фокусировки на регулярной части ускорителя. Как видно из рисунка, с увеличением радиуса инжектированного пучка ток ускорителя резко падает. Максимальный ток ускорителя (I_A) достигается при токе инжекции около 2 А, что хорошо совпадает с экспериментальными данными в ходе длительной эксплуатации ускорителя. Данные исследования также показали, что условия максимального токопрохождения через ускоритель в целом не соответствуют условиям максимального токопрохождения на отдельных его участ-

ках, что демонстрируется экспериментальными зависимостями на рис. 3. Вид этих кривых полностью объясняется особенностями радиальной динамики пучка, рассмотренной выше: с увеличением тока пушки увеличивается ток и размер пучка на входе в группирователь, что вызывает уменьшение энергии и увеличение эмиттанса пучка на выходе группирователя, который затем не вписывается в аксептансы регулярной части ускорителя. Сравнение данных рис.2 и рис.3 показывает, что расчетные и экспериментальные кривые хорошо совпадают при радиусе инжектируемого пучка 0,3 см. Из анализа этих экспериментальных результатов можно наметить пути повышения тока пучка ускорителя "Факел": с целью уменьшения размера пучка на входе в группирователь и уменьшения изменений его фазовой плотности коллиматор следует размещать непосредственно на входе в группирователь, по этой же причине оптимальным является поле соленоида порядка 900 Э, потери ускоренных частиц после группирователя можно существенно уменьшить за счет увеличения аксептанса ускорителя путем увеличения числа квадрупольных линз на фокусирующем канале и за счет более эффективного согласования эмиттанса пучка после группирователя с аксептантом последующего канала ускорителя, например, с помощью дополнительного соленоида на группирователе.

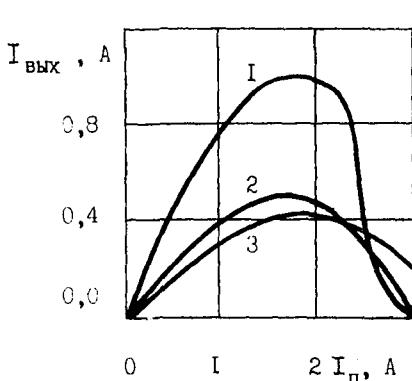


Рис. 2. Зависимость тока ускорителя от тока электронной пушки при разных радиальных размерах пучка на входе в группирователь: 1 - 3,3 мм, 2 - 6,6 мм, 3 - 10 мм.

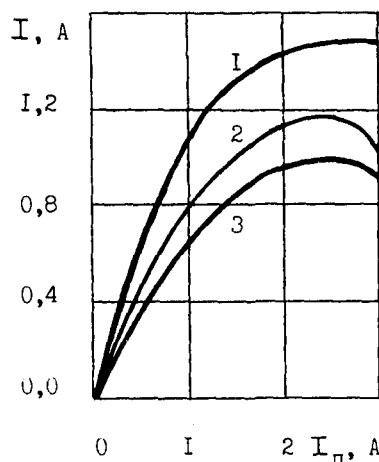


Рис. 3. Зависимость тока на выходе в группирователь (1), на выходе в ускоритель (2), на выходе ускорителя (3) от величины тока источника электронов.

Таким образом, на основании анализа экспериментальных данных и моделирования динамики интенсивных пучков в ЛУЭ можно сделать вывод о том, что технические решения, направленные на повышение тока ускорителя и улучшение качества пучков, должны обеспечивать уменьшение эмиттансов пучков после группирующих волноводов, для чего наиболее радикальным является уменьшение фазовой ширины и энергетического разброса сгустка в процессе его формирования и применение непосредственно на входе в группирователь электронной пушки с малым фазовым объемом пучка, что неизбежно ведет к другим принципам построения группирователей и систем формирования коротких импульсов тока, а также увеличение аксептанса регулярной части ускорителя и расширение возможностей согласования эмиттансов пучков с аксептантом регулярной части ускорителя.

Л и т е р а т у р а

- I. E.Keil. Diffraction Radiation of Charged Rings Moving in Currugated Cylindrical Pipe. - NIM, 1972, №.100, p.419.
2. Бурштейн Э.Л., Воскресенский Г.В. Линейные ускорители электронов с интенсивными пучками. Москва, Атомиздат, 1970.
3. Масунов Э.С. Исследование эффектов нагрузки током в линейном ускорителе. - ЖТФ, 1976, т.46, вып. I, I46 с.
4. Масунов Э.С., Рациков В.И. Группировка и самоускорение сильноточного пучка в волноволной замедляющей системе при наличии внешнего магнитного поля. - ЖТФ, 1979, т.49, вып. 7, с.1462.
5. Батыгин Ю.В. и др. Особенности динамики интенсивных пучков наносекундной длительности в линейных ускорителях. - ЖТФ, 1979, т.49, вып.10, с. 2199.
6. Воронков Р.М. и пр. Проект сильноточного линейного ускорителя электронов. - АЭ, 1969, т.26, вып.4, с.348.
7. Петренко В.В., Черноплеков Н.А. Состояние и некоторые итоги работы ускорителя "Факел". Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента. Харьков, 1983, вып.2(14), с.37.
8. Cooper R.K., Solenoid-Lens Effects in Beam Transport Equations. - Particle Accelerators, 1975, Vol.7, p.41.
9. Гинзбург В.Е., Гугнин А.А., Петренко В.В. и др. Источник электронов с малым фазовым объемом пучка. Ускорители. - Москва, Атомиздат, 1980, вып.19, с.25-29.
10. Калашников В.В., Никитушкин А.А., Пальмская М.Л., Петренко В.В., Смирнов А.В. Особенности динамики интенсивных пучков в многосекционных линейных ускорителях электронов. Аннотации докладов I3 Международной конференции по ускорителям высоких энергий. ИЯИ СО АН СССР, Новосибирск, 1986, с.85.
- II. Bergere R., Veyssiere A. A Study of Some Transversal Motions of the Electron Beam of a LINAC. - IEEE T.N.S., 1965, Vol.12, №.3, p.593.