

**О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ  
ЗА СЧЕТ ВНУТРИИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ПУЧКЕ**  
(экспериментальные результаты)

В.А.Вишняков, В.В.Закутин, В.А.Кушнир, Г.Л.Фурсов, А.М.Шендерович  
Харьковский физико-технический институт АН УССР  
Харьков, 310108

**Аннотация**

В работе рассмотрена возможность доускорения пучка линейного ускорителя с помощью цепочки пассивных резонаторов. Показана возможность получения в таких резонаторах ускоряющего поля в сотни киловольт на сантиметр при имеющихся в линейных ускорителях импульсных токах пучка в сотни миллиампер. Получены результаты экспериментальной реализации данного метода ускорения. В экспериментах при импульсном токе пучка 400 мА была получена напряженность электрического поля более 300 кВ/см. Экспериментально осуществлен сдвиг фазы ускоряемого пучка на 180° путем удлинения его траектории в системе из 4-х короткоимпульсных магнитов. При импульсном токе пучка 200 мА достигнуто 100%-ное прохождение пучка через такую дефлекторную систему, и в цепочке из 7 пассивных резонаторов получен прирост энергии частиц ~1,8 МэВ.

Развитие физики атомного ядра и элементарных частиц требует увеличения интенсивности и энергии пучков в линейных ускорителях электронов. Традиционный метод увеличения энергии существующих ускорителей состоит в увеличении числа ускоряющих секций и систем их высокочастотного питания: модуляторов, клистронов, волноводных трактов, систем электропитания и т.д. и является весьма трудоемким и дорогостоящим. Поэтому значительный интерес представляет поиск более простых и эффективных методов увеличения энергии существующих ускорителей. В настоящей работе рассматривается возможность использования для этой цели пассивных ускоряющих структур, с помощью которых осуществляется перераспределение энергии пучка ускорителя: часть его частично скопится за счет энергии, отдаваемой другими частицами (идеология автоускорения, см., напр., работу<sup>1</sup>). При этом сгруппированный пучок электронов в импульсе линейного ускорителя возбуждает высокочастотные колебания в резонансном элементе, настроенном на частоту следования сгустков  $\omega_{\psi}$  либо ее гармонику. Для остальных частиц создаются такие фазовые условия, что они попадают в ускоряющее поле и приобретают дополнительную энергию. Благодаря резонансному характеру взаимодействия эффективное перераспределение энергии в пучке происходит при импульсных токах пучка в сотни миллиампер, имеющихся в существующих ЛУЭ. При этом для ускорения пучка не требуется использования дополнительных источников высокочастотного питания и связанного с этим оборудования, так что данный метод прост и экономичен. Этот метод 2-9 доускорения уже рассматривался ранее<sup>2</sup>. В настоящей работе рассматривается возможность практической реализации доускорения пучка в системе слабосвязанных пассивных резонаторов.

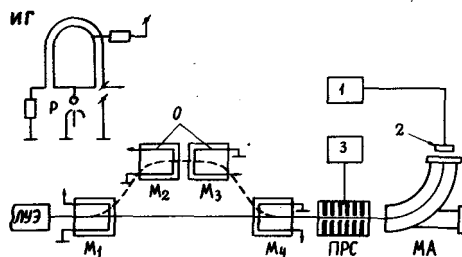
Для осуществления доускорения целесообразно использовать резонаторы с колебаниями типа  $E_{010}$ , в котором электрическое поле имеет только продольную составляющую  $E_z$ , не зависящую от продольной координаты  $z$ . При точной настройке цилиндрического резонатора на  $n$ -ую гармонику частоты повторения сгустков

$$E_{z\max} = \frac{16J_n \nu Q}{\sqrt{n^2 \omega_p^2 d R a}} \cdot \frac{J_1(\nu \frac{a}{R})}{J_1^2(\nu)} \sin \frac{\omega_0 d}{2\nu}, \quad (I)$$

где  $J_n$  -  $n$ -я гармоника тока пучка;  $Q, R, d$  - добротность, радиус и продольный размер резонатора;  $a, \nu$  - радиус и скорость пучка;  $c$  - скорость света;  $\nu$  - корень функции Бесселя  $J_0$ . Оптимальное значение  $\nu$ , при котором  $E_{z\max}$  - наибольшее значение, определяется фазовой протяженностью сгустка<sup>2</sup>, а также конструктивными соображениями (углом пролета, отверстиями для пролета пучка, электрической прочностью и т.д.). Для линейных ускорителей, работающих в десятисантиметровом диапазоне, наиболее близким к оптимальным является выбор  $\nu = 2$ . Оценка по формуле (I) показывает, что, например, при  $\nu = 2, Q = 10^4$ ,  $\nu \frac{a}{R} \ll 1, \frac{\omega_0 d}{2\nu} \ll 1$  и импульсном токе пучка 250 мА  $E_{z\max} = 500$  кВ/см.

Сдвиг фазы ускоряемых частиц можно осуществить за счет удлинения их траектории с помощью системы импульсных магнитов, либо путем инверсии фаз в системе высокочастотного питания. Достоинством первого метода является его быстроедействие, поэтому он и был использован в проведенных нами экспериментах.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1.



**Рис.1.** Схема эксперимента по доускорению пучка. МА - магнитный анализатор энергии частиц, 1,2 - система измерения импульсного тока на выходе анализатора, 3 - измеритель наведенного пучком высокочастотного сигнала.

Пучок линейного ускорителя<sup>3</sup> с энергией ~10 МэВ (ЛУЭ) возбуждал систему из 7 слабосвязанных пассивных резонаторов (ПРС), настроенных на

вторую гармонику частоты ускорителя. Добротность резонаторов составляла 10000. После достижения максимального поля в резонаторах (постоянная времени  $0,5 \text{ нс}$ ) включалась короткоимпульсная дефлекторная система, состоящая из четырех ферритовых магнитов  $M_1, M_2, M_3, M_4$ , которая удлиняла траекторию частиц на  $\sim 2,5 \text{ см}$ , т.е. на половину длины волны пассивных резонаторов. Прошедшие дефлекторную систему частицы ускорились в ПРС. Питание дефлекторной системы осуществлялось от импульсного генератора ИГ с волновым сопротивлением  $\sim 4 \Omega$  и величиной зарядного напряжения 18 кВ. Длительность импульса составляла  $100 \text{ нс}$ . Энергия частиц измерялась магнитным анализатором МА с разрешением, регулируемым от 1 до 6%.

Результаты измерений при отключенной дефлекторной системе показаны на рис.2.

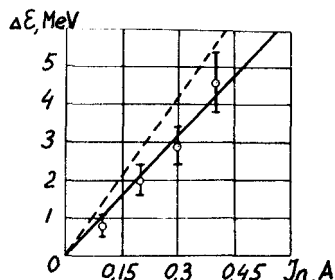


Рис.2. Зависимость потери энергии частиц пучка в цепочке пассивных резонаторов от импульсного тока пучка. Штриховой и сплошной линиями показаны результаты расчетов при фазовой протяженности сгустка соответственно 0 и  $40^\circ$ , точками показаны экспериментальные результаты.

Из рисунка видно, что при импульсном токе пучка  $400 \text{ мА}$  потери энергии составляют  $4,6 \text{ МэВ}$ , что соответствует напряженности возбуждаемого поля более  $300 \text{ кВ/см}$ . Результаты измерений хорошо согласуются с расчетом при фазовой протяженности сгустка  $40^\circ$ , характерной для данного ускорителя.

Эксперименты по доускорению проводились при импульсном токе пучка  $200 \text{ мА}$ . Разработанная методика транспортировки пучка обеспечила 100%-ное прохождение пучка через дефлекторную систему в течение  $100 \text{ нс}$ , так что величина ускоряемого импульсного тока также составляла  $200 \text{ мА}$ . Результаты измерений приведены на рис.3.

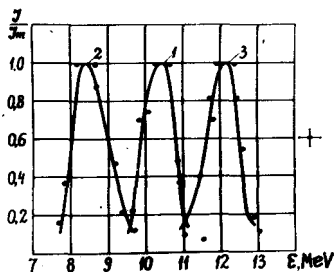


Рис.3. Энергетические спектры: 1 - пучка ускорителя, 2 - пучка, потерявшего энергию в пассивных резонаторах, 3 - пучка, ускоренного в пассивных резонаторах.

Из рисунка видно, что имеет место увеличение энергии частиц на  $\sim 1,8 \text{ МэВ}$  за счет потери энергии другими частицами ( $\sim 2 \text{ МэВ}$ ). Разница  $0,2 \text{ МэВ}$  связана с уменьшением поля в резонаторах за время нарастания поля в магнитах при включении дефлектора ( $\sim 85 \text{ нс}$ ). Из рисунка 3 также видно, что ширина спектра при доускорении пучка практически не изменяется. Следовательно, дефлекторная система мало изменяет фазовую протяженность сгустка ускорителя.

Таким образом, в проведенных экспериментах получена напряженность ускоряющего поля в сотни киловольт на сантиметр, осуществлен быстрый сдвиг фазы частиц на  $180^\circ$  со 100%-ной транспортировкой их через дефлектор и эффективное их доускорение. Полученные результаты показывают перспективность и возможность практической реализации метода доускорения пучков линейных ускорителей с помощью системы пассивных резонаторов. Данный метод рекомендуется использовать для увеличения энергии линейных ускорителей электронов ХФТИ АН УССР.

#### Литература

1. Казанский Л.Н., Киселев А.В., Лебедев А.И. Автоускорение в интенсивных электронных пучках. - Атомная энергия, 1971, т.30, вып.1, с.27-29.
2. Вишняков В.А., Ракитянский А.А., Терехов Б.А., Шендерович А.М. Некоторые новые возможности увеличения энергии и темпа ускорения в линейных резонансных ускорителях. - Украинский физический журнал, 1982, т.27, №10, с.1469-1475.
3. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Ромасько В.П., Фурсов Г.Л., Шендерович А.М. Экспериментальное исследование получения больших ускоряющих полей для доускорения пучка линейного резонансного ускорителя в пассивной резонансной структуре. - Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, 1985, т.1, с.175-177.
4. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендерович А.М. Методы увеличения энергии существующих линейных резонансных ускорителей. Обзор М.: ЦНИИатоминформ, 1984.
5. Бойко В.А., Воронков Р.М., Даниличев В.А. и др. Резонаторный ускоритель, возбуждаемый пучком. - В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Линейные ускорители, 1977, вып. 2(5), с.36.
6. Богданович Б.Ю., Останин В.А., Шальнов А.В., Яненко В.В. Линейный ускоритель электронов с использованием энергии поля излучения пучка. - В кн.: Ускорители. - М., 1981, вып. 20, с.72.
7. Воргушин М.Ф., Мудролюбов В.Г. ВЧ-система резонаторного ускорителя с возбуждением электронным пучком. - Труды XIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, 1983, т.1, с.172.
8. Бойко В.А., Воронков Р.М., Симонов К.Г. и др. Автоускорение модулированного пучка. - ЖТФ, 1982, т.52, вып.11, с.2163.
9. Фурсов Г.Л., Вишняков В.М., Вишняков И.А. и др. Линейный ускоритель электронов на среднем токе 1 МА. - Атомная энергия, 1979, т.46, с.336-340.