

Протонный инжектор линейного ускорителя Московской мезонной фабрики

В.И. Дербилов, С.К. Есин, В.Н. Зубец, Е.С. Никулин, О.Т. Фролов, В.П. Якушев
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

В результате многолетней работы осенью 1998 г. на входе 1-го резонатора ЛУ ММФ был установлен доускоритель – резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой [1, 2], который позволил снизить энергию пучка протонов из высоковольтного инжектора с 750 до 400 кэВ. Последнее дало возможность увеличить длительность импульса тока пучка с 85 до 150 мкс, не приводя к насыщению сердечник высоковольтного импульсного трансформатора. Все необходимые для этого работы по модернизации протонного инжектора [3] были выполнены в 1997-98 гг. В генераторе высоковольтных импульсов была смонтирована новая формирующая линия (ФЛ) на 50 кВ. Она состояла из 9 катушек индуктивностью $1 \times 264 \text{ мГн} + 8 \times 132 \text{ мГн}$ и 9 ячеек емкостью по 0.05 мкФ каждая. Включение части линии ($1 \times 264 \text{ мГн} + 5 \times 132 \text{ мГн}$ и 6 ячеек емкостей) обеспечивает режим работы при $U = 750 \text{ кВ}$ и $\tau_{\text{имп}} = 85 \text{ мкс}$, а всей линии – режим 400 кВ и 150 мкс.

С 23.11.1998 г. по 30.09.1999 г. инжектор [4] в пяти пучковых сеансах в общей сложности проработал около 1900 часов с длительностью импульса тока пучка до 150 мкс. Проведенное за это время усовершенствование систем линейного ускорителя [5] дало возможность ускорять пучки с длительностью импульсов более 150 мкс. Поэтому инжектор был модернизирован для получения длительности импульса тока пучка до 200 мкс за счёт увеличения ёмкостей в формирующих линиях высоковольтного модулятора и модулятора тока разряда ионного источника (ИИ). Удлинение импульса пилообразного напряжения [6], компенсирующего подъём напряжения на диодно-ёмкостном стабилизаторе вершины высоковольтного импульса ускоряющего напряжения [7], осуществлено за счёт увеличения заземляющего стабилизатор сопротивления до 1,2 кОм. Система стабилизации ускоряющего напряжения в остальном осталась без изменений и обеспечивает стабильность напряжения 400 кВ на уровне $\pm 0,3\%$. С длительностью импульса тока до 200 мкс инжектор с 18.10.1999 г. по 29.09.2000 г. в общей сложности проработал около 1600 часов. Сравнение основных параметров инжектора в режимах 750 и 400 кВ при частоте следования импульсов 50 Гц приведено в табл. 1.

Таблица 1.

Параметр	Единица измерения	Напряжение ускорения	
		750 кВ	400 кВ
Г В В И			
Напряжение выпрямителя ФЛ	кВ	22	12
Напряжение выпрямителя обострителя	кВ	12	6.5
Средний ток выпрямителей	А	0.75	0.95
Время задержки тиратрона ФЛ	мкс	55	55
Время задержки тиратрона второго обострителя	мкс	140	252
Ионный источник (ИИ)			
Падение напряжения на разряде	В	120	125
Ток разряда	А	24	36
Ток магнита	А	0.40	0.62
Напряжение вытягивания	кВ	14.5	12
Напряжение фокусировки	кВ	32	15
Ток пучка на выходе	мА	135	130

После примерно 3200 часов работы инжектора с длинным импульсом в процессе ревизии обнаружилось, что сетки в электроде вытягивания ИИ (проходное отверстие $\varnothing 35 \text{ мм}$ затянута сеткой из проволоки $\varnothing 0,1 \text{ с}$ шагом 3 мм) и в электроде ускорительной трубки (УТ) (проходное отверстие $\varnothing 190 \text{ мм}$) не пригодны для дальнейшей эксплуатации, в то время как при коротком импульсе они работали много лет. Проволоки сетки вытягивающего электрода сильно деформировались, а несколько проволок сетки УТ разрушились. В июне 2000 г. были установлены новые сетки с переплетёнными вольфрам-рениевыми проволоками $\varnothing 0,1 \text{ мм}$ и шагом 3 мм.

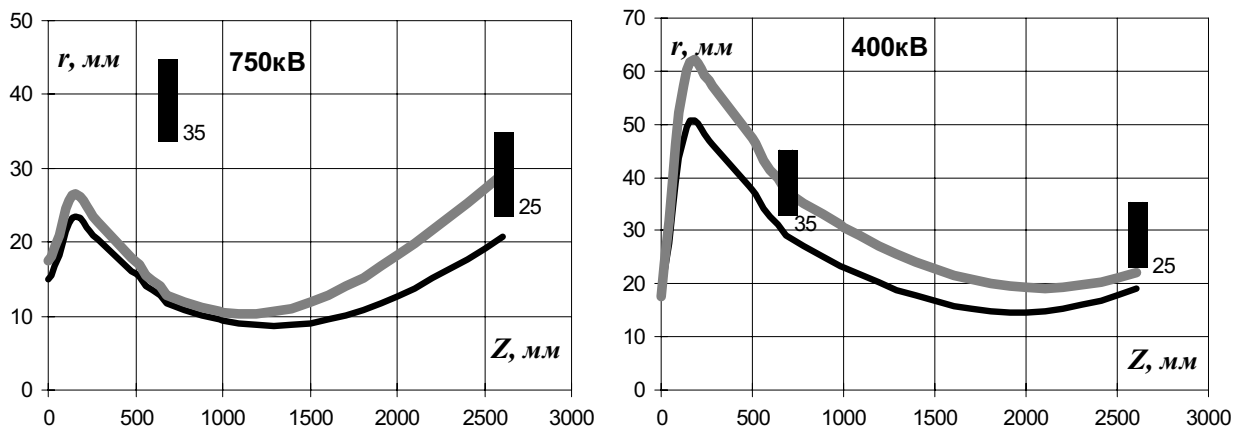


Рис. 1.

- — ядро пучка, $I = 120$ мА, $E_p = 0.25$ п·см·мрад;
- — пучок с ореолом, $I = 150$ мА, $E_p = 0.5$ п·см·мрад;
- 35 и 25 мм — радиусы выходной диафрагмы УТ и входа канала транспортировки.

На рис.1 сравниваются огибающие пучка в УТ и в пространстве дрейфа до первого солениоида канала транспортировки для режимов ускорения с энергиями протонов 750 и 400 кэВ и начальным значением наклона огибающей $r_0 = 0.2$ рад. Расчеты выполнялись по модели "микрорелятивистского" пучка Капчинского-Владимирского [8,9]. УТ имеет два ускоряющих зазора длиной 100 и 350 мм. Первый образован цилиндром $\varnothing 200$ мм, длиной 180 мм и плоской сеткой. Второй – этой же сеткой и цилиндром $\varnothing 200$ мм, закрытым изолированной от «земли» диафрагмой $\varnothing 150$ мм с проходным отверстием $\varnothing 70$ мм. Режимы фокусировки выбраны такими, чтобы сформировать адекватный пучок на входе в канал транспортировки с апертурой $\varnothing 50$ мм. Видно, что размеры пучка в УТ при 400 кВ примерно в 2 раза больше, и большая часть ореола пучка попадает на электроды УТ и ИИ, что ещё усугубляется увеличением длительности пучка и, следовательно, увеличением среднего тока.

Выпрямители вытягивания и фокусировки нагружаются соответственно токами на вытягивающий электрод с отверстием $\varnothing 35$ мм, затянута сеткой с прозрачностью 93%, и на фокусирующий электрод. Эти токи включают в себя ореол пучка и ток вторичных электронов, величина которого в 3-4 раза больше тока ореола; также добавляется нагрузка электронами, ускоряющимися в УТ в обратном направлении. Если внутреннее сопротивление выпрямителей высокое, то попадание части ореола пучка на электрод может привести к неустойчивому режиму, когда ток на электрод, снижая напряжение выпрямителя, приводит к ещё большему току на электрод за счёт расфокусировки пучка. [10]. Аналогичный процесс наблюдался и для первого ускоряющего промежутка УТ, напряжение на котором задаётся водяным делителем напряжения.

Чтобы устранить появляющиеся при увеличении длительности импульса тока пучка до 150, а затем до 200 мкс неустойчивые режимы, (когда форма импульса тока пучка сильно искажалась), в 2,5 раза было уменьшено сопротивление воды в делителе УТ. В два раза уменьшены также внутренние сопротивления выпрямителей вытягивания и фокусировки. Кроме того, чтобы устранить влияние пучка обратных электронов из УТ на напряжение вытягивания и фокусировки, на выход этих выпрямителей были подключены нагрузочные сопротивления по 12 МОм.

На рис. 2 представлены временные зависимости основных токов и напряжений инжектора. Ток пучка измерен индуктивным датчиком, установленным на расстоянии 1500 мм от выхода УТ после диафрагмы $\varnothing 50$ мм. Ток на диафрагму образуется ореолом пучка и вторичными электронами, вклад которых в 3-4 раза больше тока ионов водорода.

Из осциллограммы ускоряющего напряжения видно, что сердечник ИТ практически насыщен (в конце заднего фронта импульса остаётся очень небольшой участок с меньшим наклоном) и дальнейшее увеличение длительности, или увеличение напряжения при этой же длительности невозможны, так как вызовут недопустимое увеличение тока в обмотках ИТ и в стабилизаторе вершины импульса.

Форма фронтов напряжения на первичной обмотке ИТ определяется напряжением накопителей обострителя и резко отличается от формы фронтов напряжения на вторичной обмотке из-за влияния индуктивности высоковольтной обмотки.

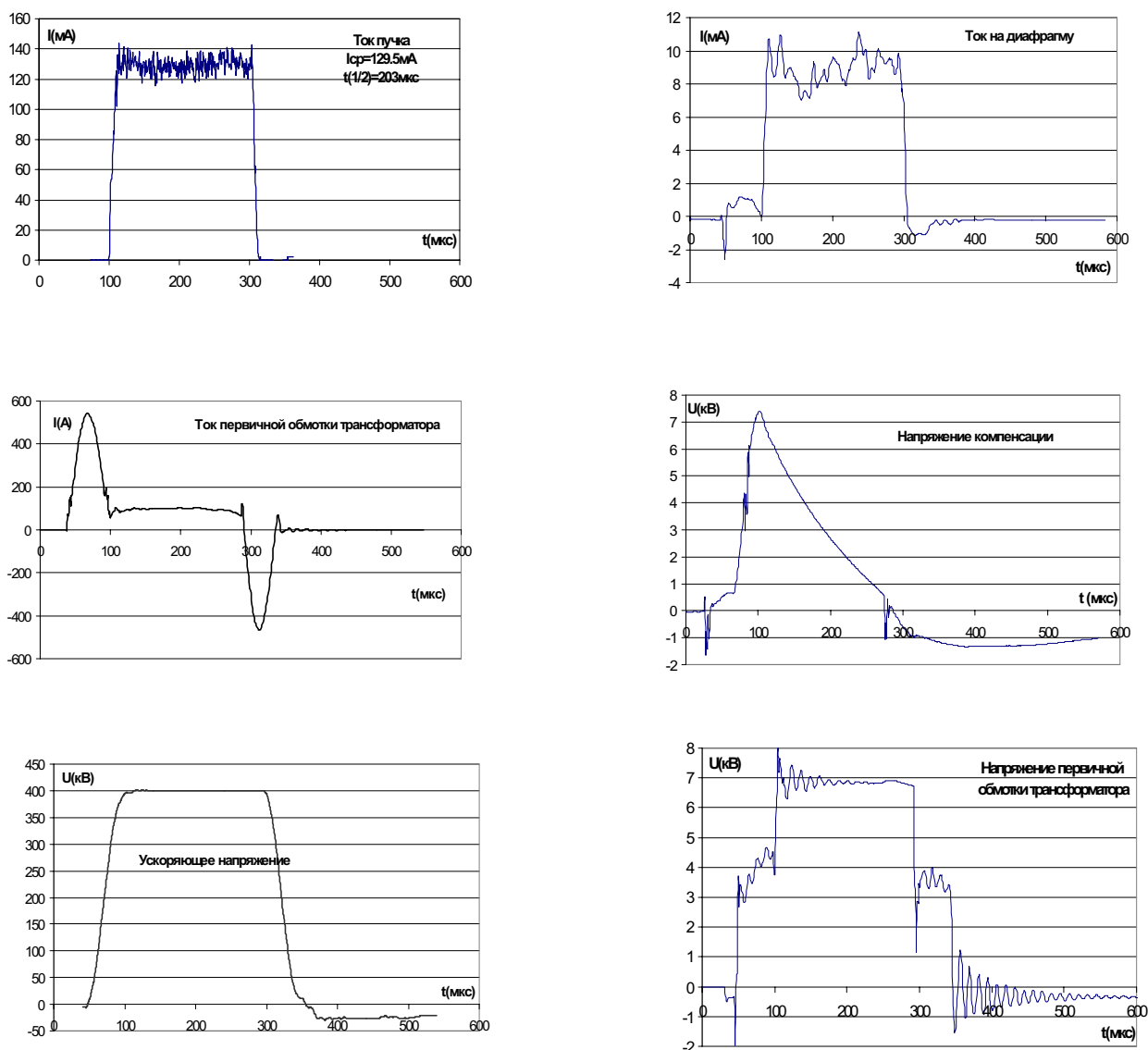


Рис. 2.

В токе первичной обмотки импульсного высоковольтного трансформатора (ИТ) резко выделяются полусинусоиды от работы обострителей переднего и заднего фронтов, которые заряжают до 400 кВ, а затем разряжают большую ёмкость конструкции инжектора. Значительно меньший ток от формирующей линии образует плоскую вершину импульса 200 мкс.

Импульс напряжения компенсации приложен к сопротивлению 1,2 кОм в момент формирования пологой вершины высоковольтного импульса. Он суммируется с напряжением на диодно-ёмкостном стабилизаторе.

Нормализованный эмиттанс для 90% тока пучка, измеренный в конце второго (из трех) участков канала транспортировки при 65-70 мА тока [11], составил 0,35 п-см-град.

Литература

1. V.A.Andreev et al. Development Of RFQ Accelerator For The MMF Linac. – Proceedings of the 1991 PAC, San-Francisco, 1991.
2. P.N.Ostroumov et al. Comissioning of the New Injection Line at INR Proton Linac. – Proceedings of the 1999 PAC, New York, 1999.
3. А.С.Белов и др. Труды XII Международной конференции по электростатическим ускорителям (Обнинск, 25 - 28 ноября 1997), Обнинск, 1999, с. 199-206.
4. A.S.Belov et al. Вопросы атомной науки техники (Украина), 1999, №3, р. 28.
5. С.К.Есин, Л.В.Кравчук, В.Л.Серов, А.В.Фещенко. Работа и модернизация линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН. Доклад на XVIII Совещании по ускорителям заряженных частиц. – Протвино, 2000.
6. V.N.Zoubetz et al. Вопросы атомной науки техники (Украина), 1999, №3, р. 52.
7. V.N.Zoubetz et al. Там же, №3, р.38.
8. И.М.Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. – Москва, Атомиздат, 1966.
9. V.N.Zoubetz et al. Вопросы атомной науки техники (Украина), 1999, №3, р. 20.
10. В.П.Якушев, А.Н.Сербинов. ПТЭ, №1, 1970, с. 241.
11. В.И.Дербиллов и др. – Труды XV Совещания по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 1996), т. 2, с. 66-69.