

# Работа протонного инжектора линейного ускорителя Московской мезонной фабрики в режиме 50 Гц со средним током пучка до 600 мкА

В.И.Дербилов, С.К.Есин, В.Н.Зубец, В.В.Киш, В.С.Кленов,  
Е.С.Никулин, О.Т.Фролов, К.А.Черных, В.П.Якушев  
ГНЦ РФ Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

В течение нескольких лет инжектор протонов обеспечивал пусковые работы на линейном ускорителе (ЛУ) Московской мезонной фабрики с частотой следования импульсов 1 Гц [1,2]. Физические эксперименты в порядке научной эксплуатации ЛУ потребовали осуществить режим работы с частотой 50 Гц. Чтобы удовлетворить жесткие требования к надежности инжектора в условиях непрерывных пучковых сеансов длительностью по 4-6 недель, были проведены усовершенствования ряда узлов и систем, наиболее существенные из которых обсуждаются в данной работе. <sup>1</sup>

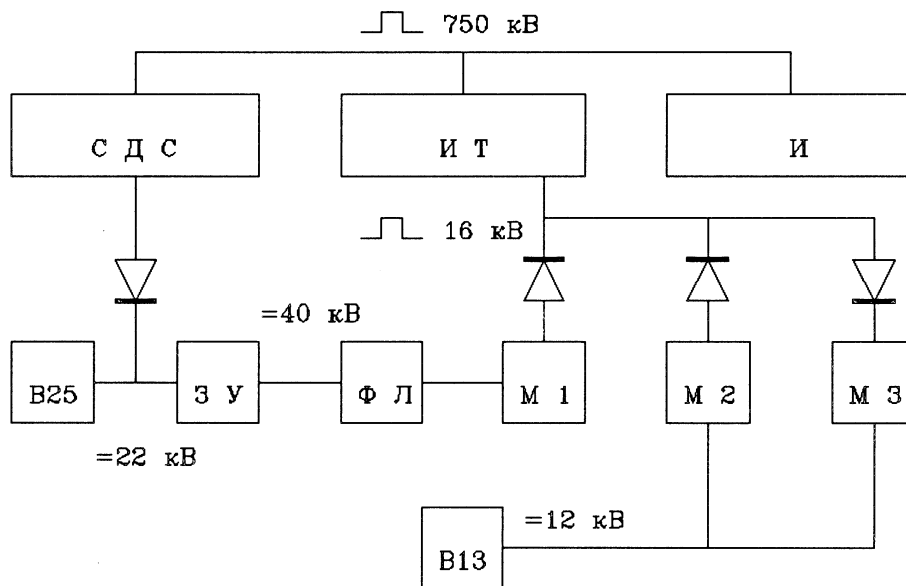


Рис. 1: Структурная схема генератора высоковольтных импульсов. ИТ — импульсный трансформатор; И — инжектор; СДС — стойка диодной стабилизации; М1 — модулятор формирующей линии; М2 — модулятор переднего фронта; М3 — модулятор заднего фронта; ФЛ — формирующая линия; ЗУ — зарядное устройство ФЛ; В13, В25 — выпрямители 13 и 25 кВ.

На рис.1 показана структурная схема генератора высоковольтных импульсов (ГВВИ), вырабатывающего ускоряющее напряжение 750 кВ. Для того чтобы исключить пропуски и нештатные срабатывания тиратронов генератора, приводящие к аварийным ситуациям, а ГВВИ внесены следующие изменения:

- последовательно с тиратронами переднего и заднего обострителей и формирующей линии (ФЛ) включены диодные сборки, облегчающие процессы восстановления напряжения на тиратронах;

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики РФ на установке линейный ускоритель ЛУММФ

– последовательно с тиратронами обострителей поставлены дроссели, индуктивности которых близки к индуктивности рассеяния импульсного трансформатора на 750 кВ (ИТ). Величина индуктивности подбирается так, чтобы минимизировать гармонические колебания тока в стойке диодной стабилизации (СДС) и колебательные перенапряжения между слоями высоковольтной обмотки ИТ;

– перезарядка конденсаторов ФЛ (после срабатывания) на положительную полярность затянута через дополнительный дроссель до 500 мкс. Таким образом, повторное срабатывание тиратрона ФЛ исключено.

Вершина импульса 750 кВ стабилизируется СДС — 32-каскадным диодноемкостным амплитудным ограничителем [3]. Потребовалось заменить диоды КД-203 на лавинные КД-206 с меньшим временем переключения, удовлетворяющие скорость нарастания импульса обратного напряжения. При этом существенно уменьшились потери в диодах на спаде импульса 750 кВ, и СДС надежно работает на частоте 50 Гц.

Из-за заряда конденсаторов СДС протекающим током вершина импульса 750 кВ может иметь подъем на 0,4–0,7% в зависимости от режима работы ГВВИ. Для компенсации этого подъема между “землей” и низкопотенциальным концом СДС подается падающее равнялся пилообразное напряжение так, чтобы в течение импульса тока пучка спад “пилы” подъему напряжения на конденсаторах. Разброс энергии частиц в пределах импульса тока стал менее 0,1%, как было измерено по сдвигу фазы сгустков сгруппированного пучка на входе ЛУ.

Сигнал для системы стабилизации вершины импульса 750 кВ (долговременной и от импульса к импульсу) вырабатывается как разность между напряжением с емкостного делителя (примерно 55 В) и стабильным опорным напряжением и составляет 1,5 В. Эта разность измеряется пиковым вольтметром в каждом импульсе. Отклонение от 1,5 В воздействует на магнитный усилитель в цепи выпрямителя 25 кВ, который в зависимости от знака отклонения увеличивает или уменьшает уровень напряжения на накопителе ГВВИ. Диапазон системы стабилизации примерно 8%. Стабильность вершины от импульса к импульсу лучше 0,05%.

Большое внимание уделено быстродействующей защите, блокирующей запускающий импульс при пробоях высокого напряжения так, чтобы не допустить подачу следующего высоковольтного импульса. Тем самым предотвращаются невосстановимые повреждения в ИТ, ускорительной трубке (УТ) и другом оборудовании. Ремонт повреждений сопряжен с большой потерей времени, особенно если необходимо вскрытие маслonaполненного ИТ. Пробои происходят в основном в УТ, но имеют место пробои и в ИТ, а также в перекрытиях по воздуху изоляторов ИТ и колоннах питания и управления ионного источника (ИИ). Идентификация факта пробоя осуществляется по укороченной длительности импульса 750 кВ.

В процессе длительной эксплуатации инжектора обнаружилась недостаточность одной этой идентификации, например если пробой произошел внутри ИТ на “хвосте” импульса. Идентификация пробоя в ИТ была дополнена 2 акустическими и 2 фотодатчиками, установленными на баке ИТ. Фотодиоды установлены на прозрачных окнах и регистрируют вспышку света при пробоях, а микрофоны — звуковой удар. Микрофоны заэкранированы от звуков пробоя в других местах инжектора. Теперь повторные пробои не зафиксированы.

На частоте 50 Гц при среднем токе пучка на выходе инжектора более 200 мкА в ИИ [4] оказались ненадежными кольцевые изоляторы из радиофарфора, на которых крепились электроды вытягивания (напряжение до 30 кВ) и фокусировки (до 45 кВ). Наблюдались частые пробои в промежутках и сильные утечки. Причиной явился сильный нагрев электродов вторичными электронами, ускоряемыми в УТ в обратном направлении. Хороший результат дало применение стержневых изоляторов. При этом изоляционные промежутки по поверхности сильно увеличились.

Конструкция ИИ показана на рис.2. Четыре стержневых изолятора из трубчатого радиофарфора диаметром 20/6 мм закреплены во фланце системы формирования. Электроды вытягивания и фокусировки “нанизаны” на изоляторы и фиксируются на них зажимами с механической разгрузкой от термического расширения. Торцы изоляторов заэкранированы. В описанной конструкции утечки и пробой отсутствуют. Она проработала более 4000 часов на частоте 50 Гц со средним током на выходе инжектора до 600 мкА.

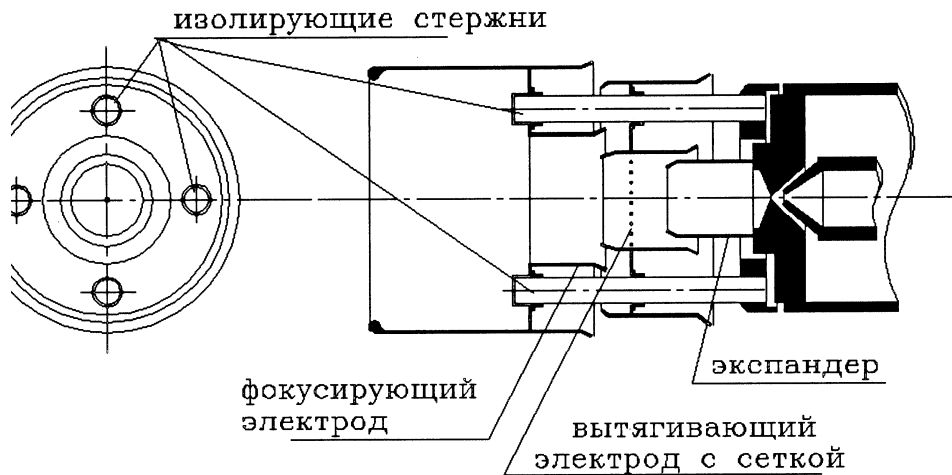


Рис. 2: Конструкция ионного источника.

Для долговременной стабильности параметров пучка в длительных пучковых сеансах необходима стабильность подачи водорода в ИИ. Водород в источник подается через стенки накаливаемой никелиевой тонкостенной трубочки размером  $\phi 4 \times 0,1 \times 500$  мм под давлением 2–3 ати. Чтобы накопление примесей, имеющих в водороде, внутри трубочки не снизило подачу водорода в источник, сделан слабый проток газа, уносящий примеси через прецизионный микровентиль. При протокке примерно  $2-5 \text{ см}^3/\text{час}$  в течение многонедельного сеанса подача газа остается стабильной. Вмешательства оператора не требуется.

УТ состоит из двух ускоряющих зазоров 100 и 300 мм, к которым приложены напряжения 300 и 450 кВ. Для увеличения фокусирующих свойств трубки на частотах 1–10 Гц отверстия в электродах УТ при потенциалах 450 и 0 кВ относительно “земли” диаметром 150 мм были закрыты сеткой из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм с шагом 3 мм. При напряжении 750 кВ на вход в канал транспортировки фокусировались токи до 440 мА [5]. На частоте 50 Гц и средних токах более 200 мкА сетка на “земляном” электроде не выдержала и была заменена диафрагмой с отверстием  $d = 100$  мм. Это несколько снизило фокусирующие свойства УТ, но и в этой конфигурации она фокусирует токи до 300 мА.

При токе на выходе инжектора 150 мкА, длительности импульса на полувысоте 80 мкс и частоте следования 50 Гц средний ток составлял 600 мкА. В канале транспортировки пучка после  $45^\circ$ -го поворотного магнита ток пучка составлял 90 мА. Типичный среднеквадратичный эмиттанс протонной составляющей пучка равен 2–2,5 п. см·мрад. Измерения проводились при работе на частоте 50 Гц, на выходе инжектора отклоняющим устройством пучок прорежался так, чтобы в измеритель эмиттанса попадал 1 импульс из 50.

В 1993-1994 гг. линейный ускоритель регулярно работал в режиме научной эксплуатации. В 9 круглосуточных пучковых сеансах длительностью 4–6 недель инжектор в общей сложности отработал 6900 часов, при этом 92% времени он был в номинальном режиме с пучком.

## Список литературы

- [1] Елсуков О.В. и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-физические исследования (теория и эксперимент), 1989, вып.6(6), с.19-22.
- [2] Былинский Ю.В. и др. — Труды 12-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — Дубна, 1990, т.2, с.164.
- [3] Белов Ю.В. и др. — Труды 8-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1983, т.2, с.159.
- [4] Belov A.S. et al. Rev. Sci. Instrum. 63(4), 1992, p.2622.
- [5] Anikeichik A.M. et al. — 1988 Linear accelerator conference proceedings, CEBAF-report-89-001, p.660.