

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. Клёнов,
Е.С. Никулин, О.Т. Фролов, К.А. Черных, В.П. Якушев
ГНЦ РФ "Институт ядерных исследований РАН", 117312, 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 надёжности 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.

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, в ГВВИ внесены следующие изменения:

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

- 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 диодно-емкостным амплитудным ограничителем [3]. Потребовалось заменить диоды КД-203 на лавинные КД-206 с меньшим временем переключения, удовлетворяющим скорость нарастания импульса обратного напряжения. При этом существенно уменьшились потери в диодах на спаде импульса 750 кВ и СДС надёжно работает на частоте 50 Гц.

Из-за заряда конденсаторов СДС протекающим током вершина импульса 750кВ может иметь подъём на 0,4 - 0,7% в зависимости от режима работы ГВВИ. Для компенсации этого подъёма между "землёй" и низкопотенциальным концом СДС подаётся падающее пилообразное напряжение так, чтобы в течение импульса тока пучка спад "пилы" равнялся подъёму напряжения на конденсаторах.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики РФ на установке Линейный ускоритель ЛУММФ.

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 невозстановимые повреждения в ИТ, ускорительной трубке (УТ) и в другом оборудовании. Ремонт повреждений сопряжён 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 перекрытия по воздуху изоляторов ИТ и колонны 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 произошёл 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 ненадёжными 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. 4 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 пробои отсутствуют. Она проработала более 4000 часов на частоте 50 Гц со средним током на выходе инжектора до 600 мкА.

Для долговременной стабильности параметров пучка в длительных пучковых сеансах необходима стабильность подачи водорода в ИИ. Водород в источник подаётся через стенки накаливаемой никелиевой тонкостенной трубочки размером $\phi 4 \times 0,1 \times 500$ мм под давлением 2 – 3 ати. Чтобы накопление примесей, имеющихся в водороде, внутри трубочки не снизило подачу водорода в источник, сделан слабый проток газа, уносящий примеси через прецизионный микровентиль. При потоке примерно 2 – 5 куб.см/час в течение многонедельного сеанса подача газа остаётся 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 мА, длительности импульса на полувысоте 80 мкс и частоте следования 50 Гц средний ток составлял 600 мкА. В канале транспортировки пучка после 45°-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 один импульс из 50.

В 93-94 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.

Литература

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

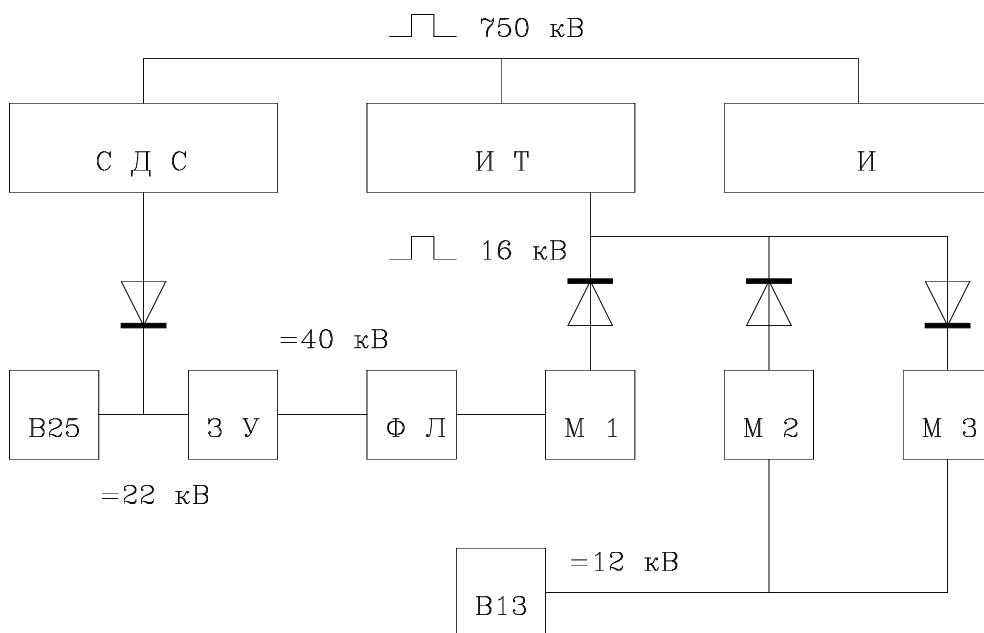


Рис.1. Структурная схема генератора высоковольтных импульсов
 ИТ - импульсный трансформатор; И - инжектор; СДС - стойка диодной стабилизации; М1 - модулятор формирующей линии; М2 - модулятор переднего фронта; М3 - модулятор заднего фронта; ФЛ - формирующая линия; ЗУ - зарядное устройство ФЛ; В13, В25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

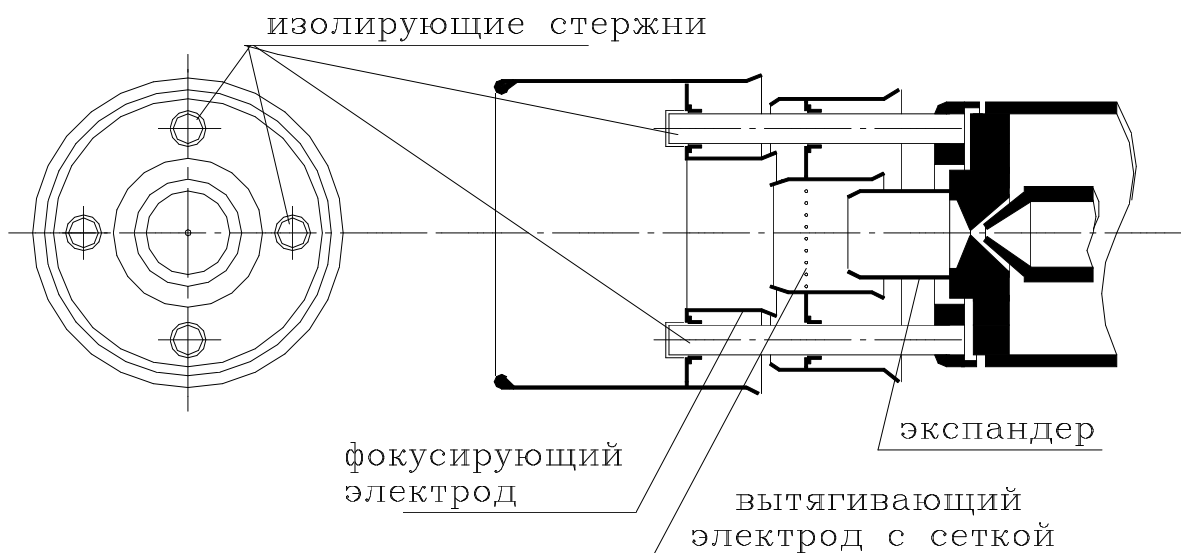


Рис.2. Конструкция ионного источника.