

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ В РЕНТГЕНОВСКИЙ ГЕНЕРАТОР НЕСТОР

*А. Бездетко, П. Гладких, С. Гоков, В. Гревцев, А. Довбня,
В. Иващенко, И. Карнаухов, А. Каламайко, Д. Коржов,
В. Кушнир, В. Митроченко, В. Лященко, А. Мыцыков¹,
А. Резаев, В. Троценко, В. Скирда, А. Зелинский, А. Щербаков*

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Работа посвящена одной из систем генератора рентгеновского излучения НЕСТОР. После магнитной системы эта система имеет наивысшую степень готовности. Структурно она может быть представлена в виде следующих составляющих. Инжектор — линейный ускоритель, канал параллельного переноса — канал транспортировки, канал ввода пучка в вакуумную камеру накопителя, импульсный инфлектор. Все оборудование было протестировано, а пучок был проведен через все элементы в объем накопительного кольца.

The work is dedicated to one of the systems of X-ray generator NESTOR. After the magnetic system, the injection system has the highest readiness. Structurally, injection system can be represented as the following components: injector — linear accelerator, the channel of parallel transportation — transport channel, the channel of the beam input in the vacuum chamber, the pulsed inflector. All equipment has been tested, and the beam was carried through all the elements in the volume of the storage ring.

PACS: 07.85.-m; 29.27.Ac

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что инжекция в компактные накопительные кольца, такие как рентгеновский генератор НЕСТОР [1], это очень сложная задача из-за очень плотного расположения оборудования. При проектировании генератора НЕСТОР было принято решение инжектировать электронный пучок через рассеянные поля поворотного магнита [2]. Однако такое решение накладывает специфические требования на канал транспортировки [3]. Еще одна особенность схемы инжекции установки НЕСТОР — это многооборотная инжекция.

После инфлектора пучок электронов оказывается в 16 мм от равновесной орбиты. Далее пучок затухает, и следующая порция электронов инжектируется в накопитель. Такая схема требует очень аккуратного расчета как инжекционной траектории, так и инфлектора. Для проведения успешной инжекции были определены допустимые точности

¹E-mail: mytskykov@kipt.kharkov.ua

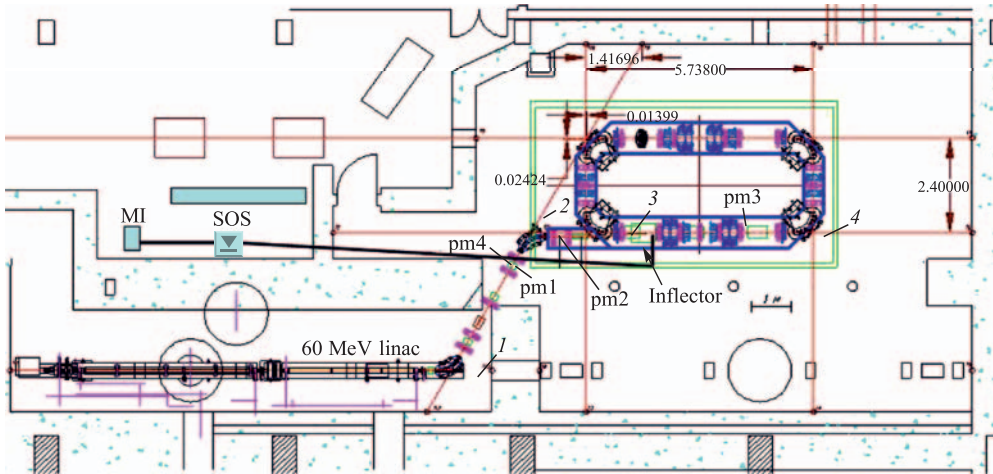


Рис. 1. Рентгеновский генератор НЕСТОР

установки оборудования на кольце и в инжекционном канале. Эмиттанс инжекционного канала и акцептанс накопителя были также согласованы.

На рис.1 приведена общая схема расположения генератора НЕСТОР. Дальнейшее изложение посвящено описанию системы инжекции и предполагаемому алгоритму ее настройки.

1. ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ

Диагностическая аппаратура линейного ускорителя позволяет контролировать основные параметры систем ускорителя. На рис.2 приведена консоль управления линейным ускорителем. На выходе каждой секции ускорителя расположены датчики тока и

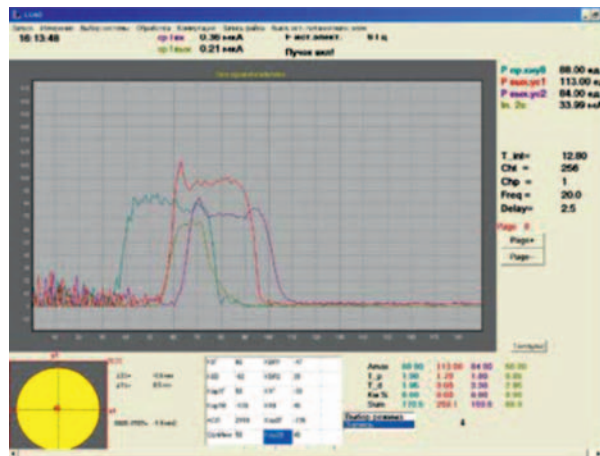


Рис. 2. Консоль управления линейным ускорителем

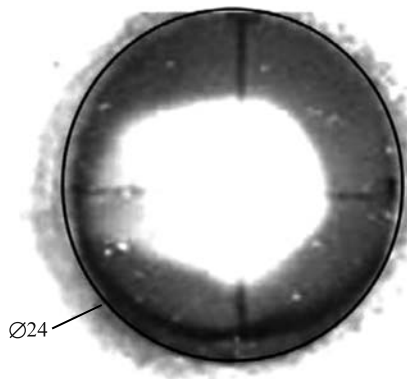


Рис. 3. Пучок электронов на выходе ЛУЭ

положения пучка. В местах, обозначенных цифрами 1–4 на рис. 1, располагаются люминесцентные экраны (ZnS). На рис. 3 приведена фотография типичной засветки пучком экрана установленного в позиции 1 (см. рис. 1).

В канале транспортировки расположены два магнитоиндукционных датчика тока и положения (pm1, pm2) перед и после второго поворотного магнита канала транспортировки. Внешний вид этих датчиков приведен на рис. 4, а основные сигналы (ток пучка и напряжения для одной координаты) на рис. 5. На прямых выходах магнитов накопителя располагаются люминесцентные экраны, подобные приведенному на рис. 3, и фотоэлек-

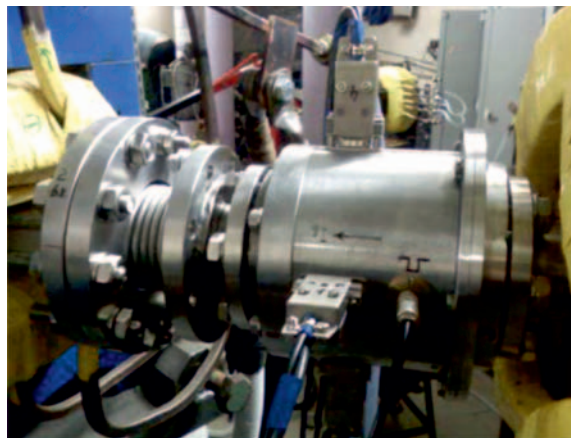


Рис. 4. Магнитоиндукционный датчик

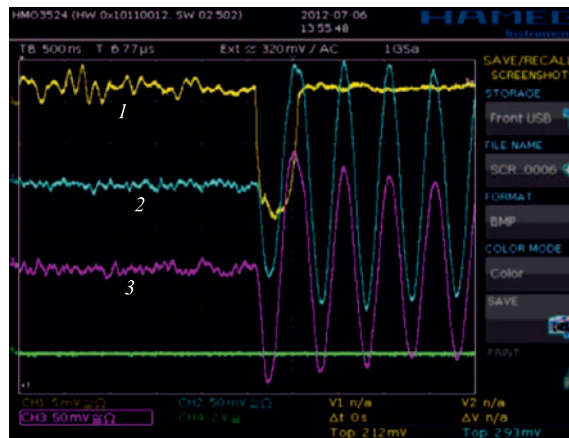


Рис. 5. Сигнал тока I и положения по X 2, 3

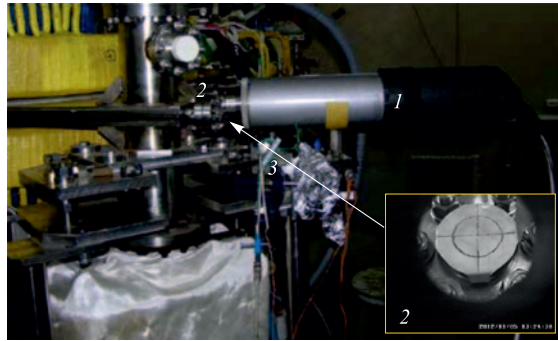


Рис. 6. Люминесцентный экран и ФЭУ на прямом выходе магнита

тронные умножители (рис. 6). На канале инъекции предусмотрены ламельные датчики для регистрации спектра электронного пучка, совмещенные с люминесцентными датчиками. Они обозначены pm3, pm4 (см. рис. 1). Эти датчики помещаются под пучок во время инъекции и служат для тонкой настройки инжектора.

2. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ [4]

Параметры линейного ускорителя приведены в табл. 1. Включения ускорителя в режиме инжектора для генератора НЕСТОР инициировали ряд доработок с целью улучшения стабильности пучка. Пучок на выходе ускорителя имеет размеры ~ 5 мм в поперечнике.

Таблица 1. Параметры линейного ускорителя

Энергия, МэВ	60–90
Несущая частота, МГц	2797,15
Частота посылок, Гц	1–50
Импульсный ток, мА	90
Длительность импульса, нс	1400
Ширина энергетического спектра (стационарный режим), %	1,5
Эмиттанс (стационарный режим), мм · мрад	0,1

3. ПРОВОДКА ПУЧКА ЧЕРЕЗ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Пятилинзовый канал параллельного переноса (рис. 7) необходим для проводки пучка через рассеянные поля магнитов накопительного кольца и неоднородное поле инфлектора. Для проверки правильности установки линз в канале транспортировки регистрировался портрет пучка на экране в поз. 2 (см. рис. 1). При этом второй магнит параллельного переноса был размагничен. После настройки ускорителя на энергию 60 МэВ последовательно включались линзы канала параллельного переноса в режиме, специально расчи-

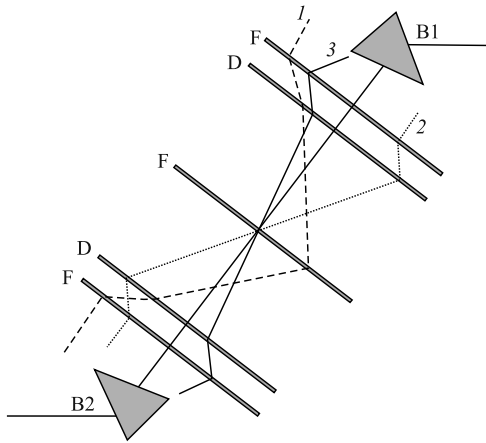


Рис. 7. Пятилинзовый канал параллельного переноса

пучка в апертуре канала транспортировки корректировалось в достаточных пределах для согласования с положением инфлектора.

К сожалению, на момент тестирования канала инъекции авторы не имели возможности запитать импульсный инфлектор. Поэтому был разработан специальный режим, позволяющий провести пучок через длинный прямолинейный промежуток к экрану в поз. 4 рис. 1. При этом на экране наблюдался пучок рис. 11.

танном для фокусировки пучка на экране 2 (см. рис. 1). Этот процесс поэтапно отображен на рис. 8. Следующий участок канала транспортировки проходит в рассеянных полях магнитов накопительного кольца. Трасса пучка проходит через апертуру диаметром 10 мм и длиной 200 мм экранирующей трубы в вакуумной камере поворотного магнита и далее через апертуру 11-мм трубки между полюсами линз (рис. 9). Между этими участками с малым зазором лежит область краевого поля магнита. Такая геометрия потребовала не только точного моделирования [5], но и предварительного измерения магнитных полей.

На рис. 10 приведены фото пучка, проведенного через весь инжекционный канал на вход инфлектора. Положение пучка в апертуре канала транспортировки корректировалось в достаточных пределах для согласования с положением инфлектора.

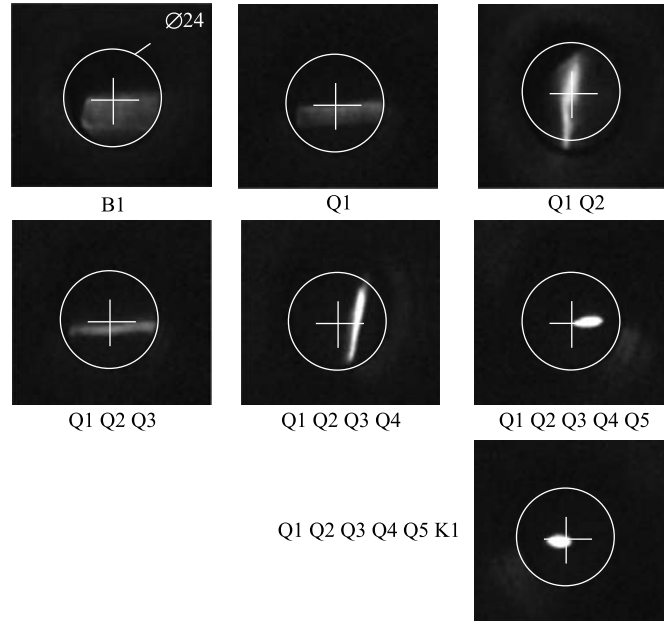


Рис. 8. Последовательное включение магнитов канала параллельного переноса

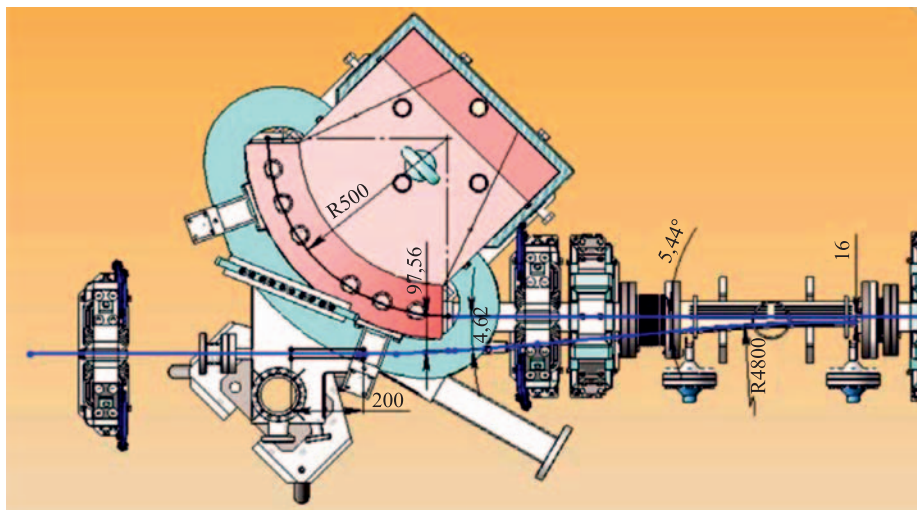


Рис. 9. Ввод пучка в вакуумный объем накопителя

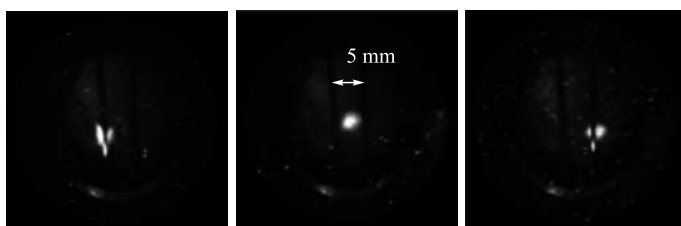


Рис. 10. Пучок на входе в инфлектор 3 рис. 1



Рис. 11. Пучок за вторым магнитом 4 рис. 1

Проведенные эксперименты показали правильность установки магнитов канала инжекции.

4. ИМПУЛЬСНЫЙ ИНФЛЕКТОР

Основные параметры инфлектора [5] приведены в табл. 2. На рис. 12 дан вид инфлектора и его электродов.

Запитывается инфлектор с помощью модулятора, изготовленного в ИЯФ (Новосибирск). Схема, иллюстрирующая работу модулятора, приведена на рис. 13. На рис. 14

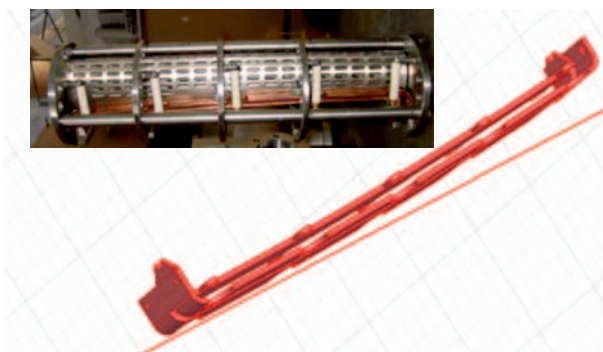


Таблица 2. Основные параметры инфлектора

Импеданс Ω	50
Угол отклонения пучка, $^\circ$	5,44
Напряжение, кВ	60
Ток, кА	1,2
Длительность импульса, нс	50
Время роста и спада, нс	5
Стабильность, %	1

Рис. 12. Инфлексор и его электроды

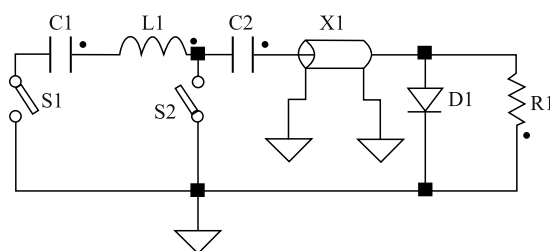


Рис. 13. Принципиальная схема модулятора инфлектора

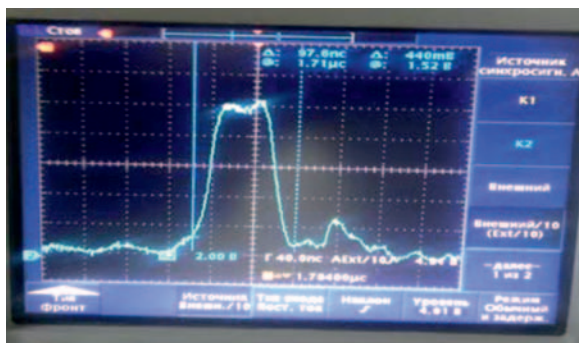


Рис. 14. Осциллограмма импульса модулятора инфлектора

приведена осциллограмма импульса (60 кВ, 50 нс, 1,2 кА), полученная при испытаниях модулятора.

При инжекции в накопительное кольцо пучка электронов возможны некоторые отклонения параметров магнитного поля инфлектора от проектных. Эти отклонения вызваны нестабильностью генератора электрического тока, а также ошибками изготовления инфлектора. По результатам измерений суммарные допуски на отклонения магнитного поля от расчетного составляют 5% (максимальное отклонение).

Для оценки влияния отклонения параметров магнитного поля на эффективность инъекции было проведено численное моделирование с использованием программы MadX. Каждый электрод инфлектора имеет шесть точек крепления и фактически пять независимых участков с постоянным значением поля на каждом из них. Поэтому при моделировании использовались две модели инфлектора, представляющие собой пять и десять промежутков, на каждом из которых случайным образом вводились отклонения его поля от проектного. При моделировании предполагалось, что отклонение поля инфлектора от проектного имеет нормальное распределение со стандартным отклонением 5%. После набора статистики были вычислены значения среднеквадратических отклонений координат пучка на выходе инфлектора. Они составили:

- для пяти промежутков: $dX = 0,75$ мм, $dPX = 2,5$ мрад;
- для десяти промежутков: $dX = 0,56$ мм, $dPX = 2,4$ мрад.

Эффективность инъекции составляет для идеального случая 56%, для одного описанного отклонения 55% а для трех 32%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная система инъекции в рентгеновский генератор НЕСТОР позволяет получить ток в накопительном кольце с эффективностью не хуже 40%. Предусмотренный режим многооборотной инъекции позволит работать с номинальными накопленными токами 100 мА и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bulyak E. et al.* Compact X-ray Source Based on Compton Backscattering // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 487. P. 241–248.
2. *Gladkikh P. et al.* Investigation of Injection through Bending Magnet Fringe Fields in X-rays Source Based on Storage Ring NESTOR // Eur. Part. Accel. Conf., Lucerne, Switzerland, 2004. P. 1434–1436.
3. *Gladkikh P. et al.* NESTOR Facility Injection Conception // Problems of At. Science and Technology. 2011. No. 3. Ser.: Nucl. Phys. Investigations. V. 73. P. 75–82.
4. *Buki A. et al.* Research Complex LINAC-300 Upgrade Project and the Lines of Nuclear Research // Problems of At. Science and Technology. 2009. No. 5. Ser.: Nucl. Phys. Investigations. V. 52. P. 134–140.
5. *Zelinsky A. et al.* Injection Scheme of X-ray Source NESTOR // Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 2008. P. 3167–3169.