



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований

дубна

СЗ4511

Г-691

23/IV-79

9 - 12148

Б.Г.Горинов, Г.В.Долбилов, Н.И.Лебедев,
В.А.Петров, В.А.Петров, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев,
А.А.Фатеев, У.Эберль

1573/2-79

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ
С ПОВЫШЕННОЙ ЦИКЛИЧНОСТЬЮ.

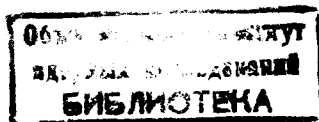
СИЛУНД II

1979

9 - 12148

Б.Г.Горинов, Г.В.Долбилов, Н.И.Лебедев,
В.А.Петров, В.А.Петров, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев,
А.А.Фатеев, У.Эберль

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ
С ПОВЫШЕННОЙ ЦИКЛИЧНОСТЬЮ.
СИЛУНД II



Экспериментальное исследование систем индукционного ускорителя с повышенной цикличностью. СИЛУНД II

Приведены результаты работ по исследованию систем нового инжектора коллективного ускорителя - линейного индукционного ускорителя электронов с частотой повторения циклов 50 Гц. Ускорительная секция, состоящая из 24 индукторов на ферритах К 250x170x25 200 НН 2 способна формировать ускоряющее поле напряженностью 4,5-5 кВ/см. Модулятор, питающий ускорительную секцию, работает на одном тиратроне ТГИ1-2500/50 и формирует импульсы напряжения суммарной величины 350 кВ, длительностью 30-40 нс при токе в нагрузке 1000-1200 А. Разработанная система питания фокусирующих катушек формирует импульсы тока 1,5-2 кА длительностью 40-50 мкс с частотой 50 Гц в фокусирующих катушках, создающих продольное магнитное поле напряженностью 2-3 кЭ. В качестве источника электронов использовано устройство, аналогичное источнику, работающему на ускорителе СИЛУНД.

В результате настройки и отладки источника электронов совместно с ускорительной секцией получен пучок электронов с током 1000 А при частоте 50 Гц.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Experimental Study of the Systems of Inductive Accelerators of Enhanced Cyclicity. SILUND II

The results of the experiments on the study of the new collective accelerator injector-linear inductive electron accelerator with the cycle repetition frequency of 50 Hz are given. Accelerating section consisting of 24 inductors at ferrites K 250x170x25 200 NH2 is able to create the accelerating field with the intensity of 4,5-5 kV/cm. Modulator supplying the accelerating section operates at one thyatron TGH-2500/5 and forms the intensity pulses of 350 Kw, with the duration of 30-40 ns at the current in loading of 1000-1200 A. The elaborated supply system of the focusing coils creates the current pulses of 1,5-2 kA with the duration of 40-50 mks with the frequency of 50 Hz in the focusing coils forming longitudinal magnetic field with the intensity of 2-3 kOe. The device analogous to the source operating at SILUND accelerator is used as the electron source. Resulting in the treatment and adjustment of the electron source jointly with the accelerating section, the electron beam with the current of 1000 A at the frequency of 50 Hz has been obtained.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений развития коллективного ускорителя с электронными кольцами является повышение частоты повторения циклов ускорения. В настоящем сообщении приведены результаты работ по исследованию систем нового инжектора коллективного ускорителя - линейного индукционного ускорителя электронов с частотой повторения 50 Гц.

Параметры пучка электронов инжектора во многом определяются выбранной схемой формирования электронных колец. При разработке систем индукционного ускорителя электронов за основу была принята традиционная для ОНМУ схема коллективного ускорителя^{/1-3/}.

При радиусе инжекции $R_{инж} \approx 40$ см и однооборотной системе захвата для формирования колец с числом электронов $N_e = 10^{13}$ необходим пучок с током $I \approx 200$ А и длительностью $\tau \approx 8$ нс. Однако для проведения исследований по формированию колец с повышенной интенсивностью, с учетом возможных потерь частиц при инжекции, ток пучка должен быть увеличен до ~ 1000 А.

Поскольку в настоящее время в коллективных ускорителях с электронными кольцами нашли применение инжекционные системы с числом оборотов $n \leq 5$, максимальная длительность рабочей части импульса тока инжектора составляет ≈ 40 нс. Дальнейшее увеличение длительности тока нецелесообразно вследствие большой средней мощности пучка при $f = 50$ Гц и излишнего увеличения энергоемкости и стоимости импульсной ускоряющей системы.

Исходя из близости требований, предъявляемых к ускорителям СИЛУНД II и СИЛУНД^{1/1}, в основу новой установки положены те же принципы построения, что и в основу существующего ускорителя. Переход на повышенные частоты повторения циклов, сопровождающийся резким увеличением тепловых и радиационных нагрузок на узлы и системы ускорителя, потребовал для большинства систем новых схемных решений.

ИНДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА

Ускорительная секция включает в себя 24 ускоряющих элемента - индуктора, выполненных на ферритовых сердечниках К 250x170x25 200 НН2.

Основные параметры индуктора: $U \cdot \tau_{\text{ср}} \approx 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ В} \cdot \text{с}$, где U - амплитуда и $\tau_{\text{ср}}$ - средняя длительность импульса ускоряющего напряжения, $Z_{\text{эфф}} = 40 \text{ Ом}$ - эффективный импеданс ненагруженного индуктора.

Ускорительная секция имеет следующие конструктивные особенности.

Два индуктора заключены в общий металлический корпус. Первичные витки обоих индукторов соединены параллельно и подключены к двум диаметрально расположенным высоковольтным вводам. Импульс тока размагничивания подается через отдельный ввод, подключенный к первичным виткам. Корпуса индукторов, объединенные в секцию, заполнены жидким диэлектриком.

Напряжение на витках контролируется на одном из вводов высоковольтным делителем с временем нарастания $< 2 \text{ нс}$.

МОДУЛЯТОР-ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Модулятор ускоряющей системы включает в себя накопитель энергии - сосредоточенную емкость, коммутирующий элемент - тиратрон ТГИ1-2500/50, а также элементы формирования фронта и длительности импульса. Существующий в ускорителе СИЛУНД вариант модулято-

ра^{1/1} содержит тиратрон ТГИ1-2500/50, работающий в наносекундном диапазоне импульсов. Каждый модулятор ускорителя нагружен на три индуктора, ускоряющая секция использует шесть, а весь ускоритель - тридцать тиратронов.

Синхронизация такой большой группы тиратронов с точностью $\pm 1 \text{ нс}$ представляет определенные трудности и на ускорителе СИЛУНД достигается путем форсирования режимов питания накала катода и накала генератора водорода отдельных тиратронов^{4/4}.

Для ускорителя СИЛУНД II предложена новая схема, в которой один модулятор может быть нагружен на 24 или большее число индукторов, что существенно сокращает число тиратронов во всем ускорителе. В новой схеме модулятора тиратрон работает в микросекундном диапазоне импульсов. Уменьшение длительности импульса в нагрузке и увеличение импульсной мощности достигается

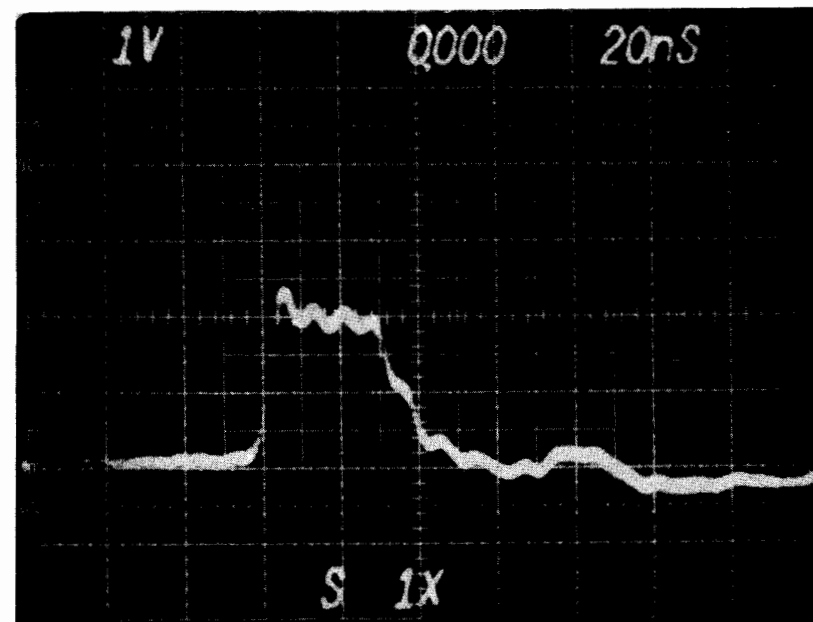


Рис. 1

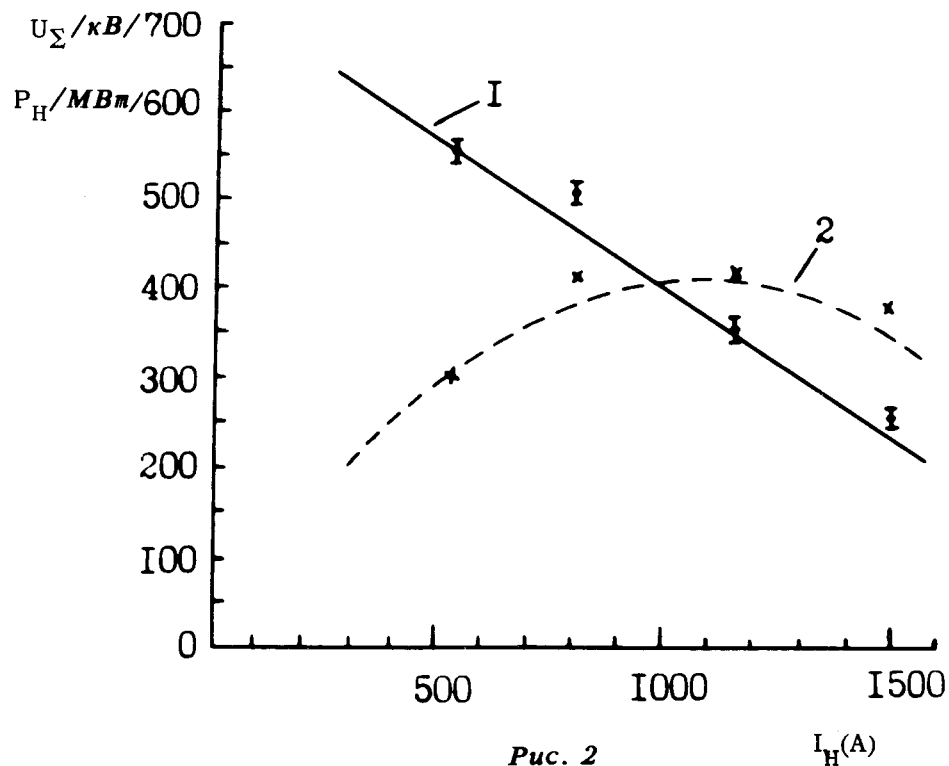


Рис. 2

применением нелинейных схем трансформирования мощности, согласованных с элементами формирования импульса и нагрузкой. Формирование импульса /до ~ 7 нс/ на первичных витках индукторов производится с помощью нелинейных обострителей, а длительность импульса формируется с помощью коаксиальных линий.

На рис. 1 приведена осциллограмма импульса напряжения на вводах индукторов нагруженного модулятора. Скорость развертки осциллографа составляет 20 нс/дел, суммарное напряжение всех индукторов модулятора - 350 кВ под нагрузкой.

На рис. 2 приведены нагрузочные характеристики нового модулятора: суммарное напряжение для одной секции индукторов U_Σ - кривая 1 - и мощности в нагрузке

P_H - кривая 2 - в зависимости от величины тока в активной нагрузке, являющейся в измерениях эквивалентом электронного пучка. Из рисунка видно, что максимальная передача мощности в нагрузку /~ 400 МВт/ происходит в диапазоне токов 1000 ÷ 1200 А, суммарное напряжение при этом равно 350 ÷ 400 кВ. Это соответствует эффективной напряженности ускоряющего поля 4,5 ÷ 5 кВ/см. Таким образом, новая схема является вполне приемлемой для ускорителя.

Для запуска тиратронов модуляторов разработан тиристорный генератор запускающих импульсов^{75/}, формирующий на сетке тиратрона импульсы амплитудой ~ 1,5 кВ с фронтом ~ 100 нс и длительностью, обеспечивающей надежный запуск тиратронов со стабильностью не хуже ± 1 нс.

Внешний вид индукционной системы и модулятора приведен на рис. 3.

ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА

Расчеты, выполненные по методу, изложенному в работе^{6/}, показывают, что для транспортировки пучка с током 1 кА и энергией частиц 0,3 ÷ 0,2 МэВ необходимо использовать соленоидальное магнитное поле. Опыт работы с реальными пучками с током ~ 1 кА на ускорителе СИЛУНД указывает на необходимость формирования фокусирующих полей с напряженностью 2 ÷ 3 кЭ. Одна из возможностей формирования подобных полей - при помощи расположенных в зазоре между ферритовыми кольцами и ускоряющей трубой импульсных катушек, число ампервитков в которых в пересчете на один метр должно составлять /2 ÷ 3/ · 10⁵. При заданных размерах корпуса индукторов, колец и трубки отдельные катушки должны иметь /1 ÷ 1,5/ · 10⁴ ампервитков, что могут обеспечить, например, 8 ÷ 10 витков с током 1 ÷ 1,5 кА.

Созданная для разрабатываемого ускорителя система питания фокусирующих катушек использует разряд накопительных емкостей на отдельные катушки, при котором формируется импульс тока, имеющий форму половины пери-

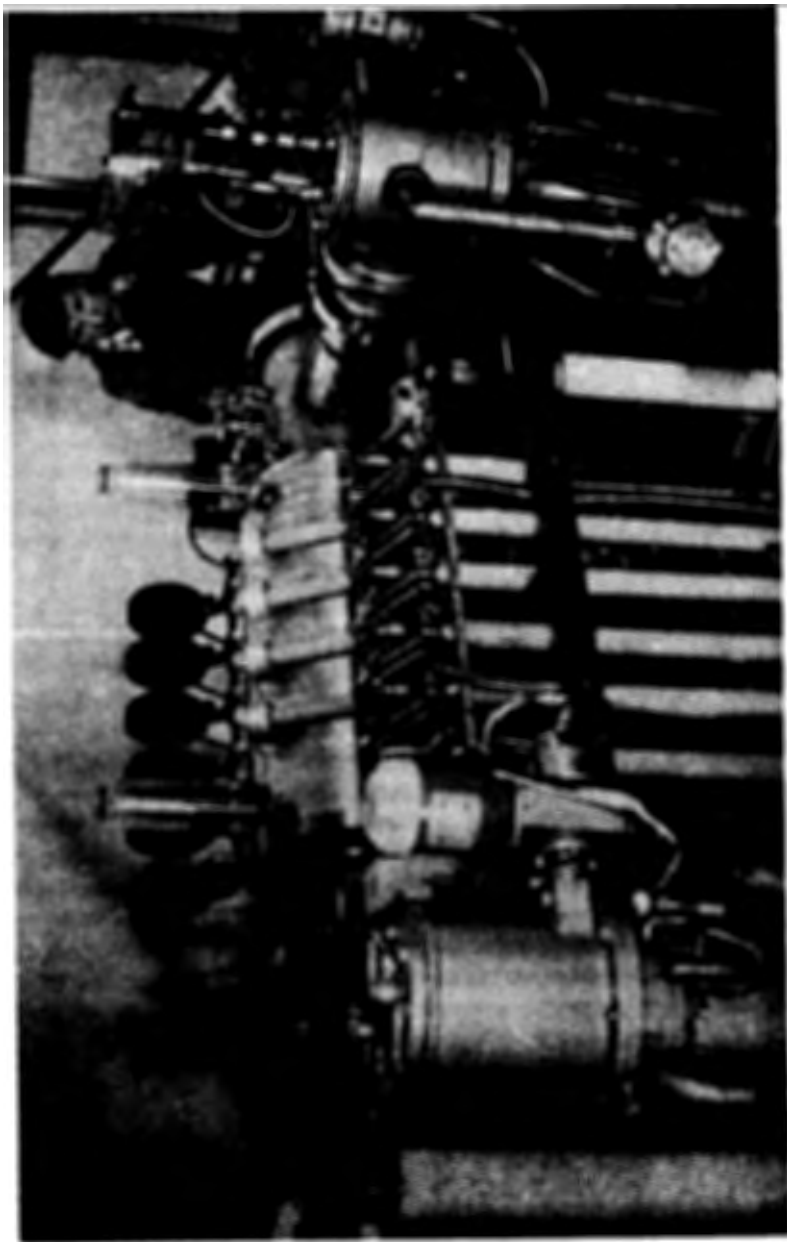


Рис. 3

ода синусоиды. При выборе параметров импульса, определяющих требования к схеме, основное внимание было уделено снижению тепловыделений в элементах схемы и в первую очередь в катушках. С этой целью длительность импульса тока была снижена до значений, определяемых предельно допустимыми значениями динамических характеристик коммутирующих элементов - тиристоров, которым было отдано предпочтение из-за простоты и удобства в обращении. С другой стороны, дальнейшее сокращение длительности импульса приводит к резкому усилению явления скинирования тока в обмотках катушек и соединениях, приводящему к увеличению эффективного омического сопротивления.

При использовании в схеме коммутаторов, выполненных на основе импульсных частотных тиристоров ТЧИ-100, обладающих высокой критической скоростью нарастания прямого тока $\sim 8 \cdot 10^8 \text{ А/с}$, и фильтровых конденсаторов повышенной мощности ФСТ-4-13, система питания способна формировать в фокусирующих катушках импульсы тока амплитудой $1,5 \div 2 \text{ кА}$, длительностью $40 \div 50 \text{ мкс}$ с частотой 50 Гц . Однако даже в этом диапазоне длительностей проявление скин-эффекта существенно и требует принятия дополнительных мер к снижению эффективного сопротивления обмоток катушек, например использования для намотки катушек многожильного медного провода с изолированными жилами.

Система питания использует общую зарядку группы накопительных емкостей, питающих катушки одной ускоряющей секции, от одного мощного полупроводникового выпрямителя. Накопительные емкости внутри группы заряжаются параллельно через развязывающие дроссели. В схеме предусмотрена возможность рекуперации энергии перезаряженных емкостей через развязывающие дроссели и вентили выпрямителя.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Электронная аппаратура системы управления ускорителем СИЛУНД II включает в себя устройство синхронизации, системы стабилизации, диагностики пучка, устройства контроля параметров ускорителя.

Система синхронизации обрабатывает сигналы запуска различных устройств по автономным каналам в определенной временной последовательности. Параллельная организация включения цифровых программных задержек с общим кварцевым генератором позволяет в широких пределах изменять временную задержку каждого канала. Джиттер между каналами не превышает 1 нс во всех диапазонах регулировки. Предусмотрен режим работы "серия - выдержка", который снижает тепловую и радиационную нагрузку оборудования ускорителя в ходе наладочных и экспериментальных работ.

Информация с датчиков величины параметра устройства ускорителя и с датчиков диагностики пучка поступает в контрольно-измерительную аппаратуру через 64-канальный аналоговый коммутатор, который расположен непосредственно в стендовом помещении. Управление порядком вывода информации производится программным путем с пульта управления.

Блоки электронной аппаратуры изготовлены в стандарте КАМАК. Это позволит в дальнейшем произвести подключение всей системы в линию с ЭВМ и оптимизировать режимы работы ускорителя.

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ

В качестве источника электронов на ускорителе СИЛУНД II используется устройство, описанное в работе^{1/1}. Схема источника приведена на рис. 4. В длинной диэлектрической разрядной трубе 1 с диаметром 80 мм на расстоянии 80 см установлены катод К - графитовая игла - и металлический анод с проходным отверстием ϕ 70 мм. Натекателями 2 в трубе формируются перепад давления остаточного газа от катода к аноду с 10^{-2} Тор до 10^{-3} Тор. Разрядная труба размещается внутри ускоряющей секции. Таким образом, имеется возможность сформировать в разрядном промежутке продольное фокусирующее магнитное поле и при включении индукторов - вихревое ускоряющее электрическое поле.

Включением катодного генератора импульсных напряжений /ГИН/ на катоде формируется импульс амплитудой

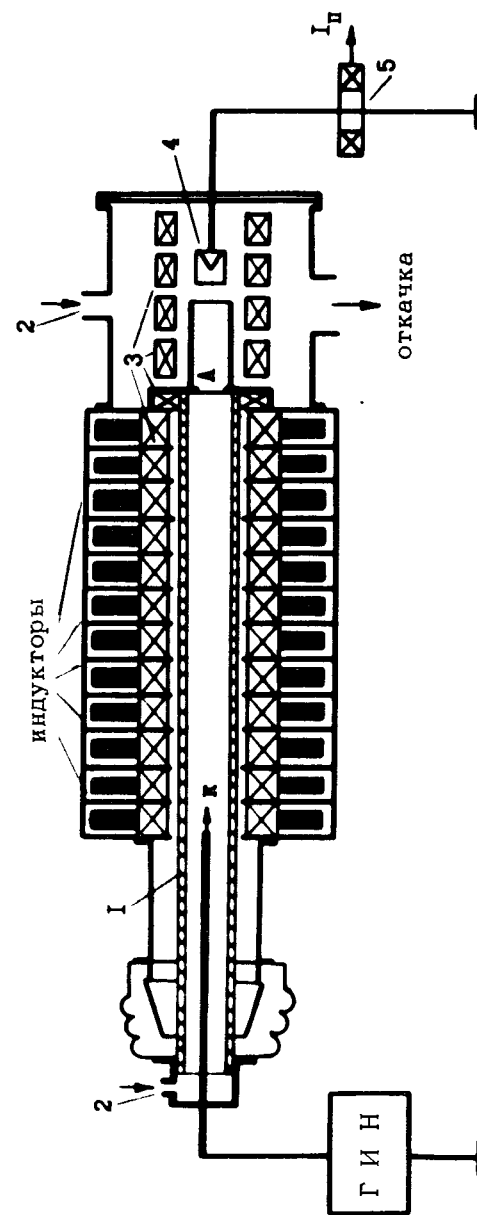


Рис. 4

60 ÷ 80 кВ длительностью 300 ÷ 400 нс и в трубке создается разрядная плазма с градиентом плотности от анода к катоду. Через время задержки 300 ÷ 350 нс включаются индукторы ускоряющей секции. При этом в разрядной трубке формируется пучок электронов с током 1000 ÷ 1200 А. Величину тока пучка I_n , проходящего через анод, определяют несколько факторов: суммарное напряжение ускоряющей секции, плотность и размеры плазменных образований в разрядном промежутке, величина и распределение магнитного поля, сформированного фокусирующими катушками 3 /рис. 2/.

Вариант источника, работающий на ускорителе СИЛУНД, использует в качестве катода вольфрамовую иглу, а анодом служит сетка из нержавеющей стали с геометрической прозрачностью 60%. При переходе на режим работы с частотой 50 Гц основные конструкционные элементы источника - катод, анод и разрядная трубка - оказались в экстремальных термических и электрических условиях, часто выходили из строя. Для увеличения надежности и стабильности работы источника вольфрамовая игла катода была заменена на графитовую, а вместо анодной сетки установлен анод из нержавеющей стали, охлаждаемый проточной водой. В результате удалось существенно повысить работоспособность конструкции и достичь устойчивой работы источника в течение нескольких часов. В то же время еще требует своего решения проблема долговременной стабильности работы источника.

Эта проблема состоит в том, что в режиме генерирования пучков с током ~1000 А с частотой 50 Гц происходит интенсивное разрушение катодной иглы, что приводит к постепенному снижению тока пучка, появлению нестабильности формы и амплитуды импульса тока.

В настоящее время на ускорителе СИЛУНД II произведены наладка и испытания модулятора и индукторов одной ускоряющей секции, системы питания фокусирующих катушек и размагничивания нелинейных элементов модулятора. Произведены наладка и испытания в различных режимах источника электронов совместно с ускоряющей секцией при работе на частоте 50 Гц. Во время испытаний получен устойчивый режим генерирования электронного пучка с током $I_n = 1000$ А. Измерения тока пучка производились

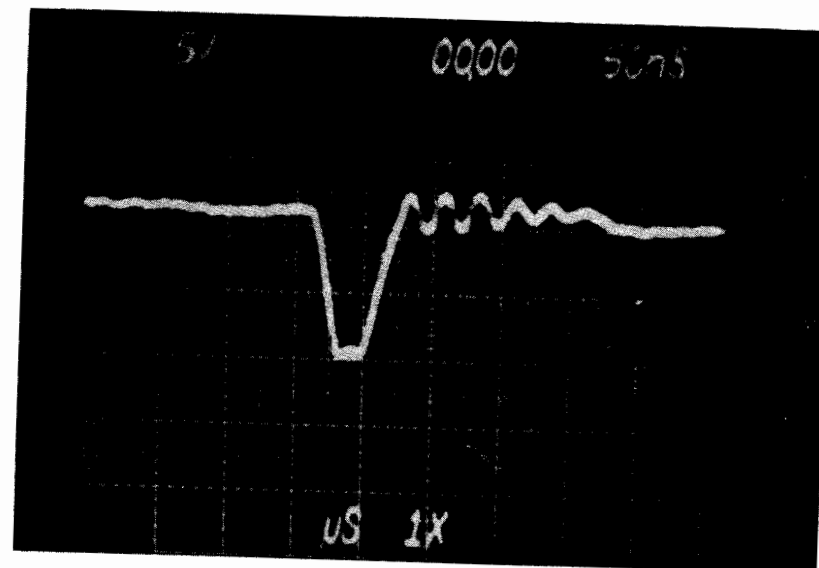


Рис. 5

цилиндром Фарадея 4 /рис. 4/ с помощью пояса Роговского. На рис. 5 представлена осциллограмма сигнала с пояса Роговского, установленного в цепи цилиндра Фарадея, который соответствует току пучка электронов 800 А. Скорость развертки составляет 50 нс/дел. Результаты экспериментов с использованием новых схемных решений подтверждают принципиальную возможность создания интенсивного линейного индукционного ускорителя электронов с повышенной цикличностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабаш А.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
2. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10053, Дубна, 1974.
3. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10054, Дубна, 1974.
4. Беляев А.П. и др. ОИЯИ, 9-10313, Дубна, 1976.

5. Безнощенко Н.И., Лебедев Н.И., Фатеев А.А. ОИЯИ, 13-12161, Дубна, 1978.
6. Беляев А.П. и др. ОИЯИ, 9-8289, Дубна, 1974.

*Рукопись поступила в издательский отдел
29 декабря 1978 года.*