

5601

Экз. чит. зал

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 5601



ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

В.Д. Гитт, А.Д. Коваленко,  
П.И. Рыльцев, В.П. Саранцев

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ  
ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ  
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА  
СИЛУНД

1971

Р9 - 5601

В.Д. Гитт, А.Д. Коваленко,  
П.И. Рыльцев, В.П. Саранцев

**СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ  
ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ  
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА  
СИЛУНД**

**Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ**

Линейный индукционный ускоритель /1,2/ является устройством, позволяющим получать моноэнергетические релятивистские пучки заряженных частиц большой интенсивности, используемые для проведения исследований в области новых методов ускорения, квантовой радиофизики и др.

Вихревое электрическое поле, силами которого ускоряются частицы в таком ускорителе, создается последовательностью импульсных трансформаторов - индукторов, первичные одновитковые обмотки которых возбуждаются импульсами от специальных генераторов. Роль вторичной обмотки, общей для всех индукторов, выполняет ускоряемый пучок. Эксплуатируемый в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ индукционный ускоритель ЛИУ-3000 может ускорять электронные пучки с током до 200 а, длительностью  $2 \cdot 10^{-7}$  сек, однако специфика создания плотных электронных колец для целей коллективного ускорения ионов потребовала разработки нового ускорителя.

Разработанный высокоточный индукционный линейный ускоритель наносекундного диапазона (СИЛУНД) имеет следующие параметры: ускоряемые частицы - электроны; энергия ускоренных частиц -  $E = 3,0$  Мэв; максимальный ток ускоренного пучка  $I = 2000$  а; длительность импульса тока  $\tau = 20$  нсек; максимальная частота следования импульсов  $f_n = 50$  гц; относительный энергетический разброс частиц на выходе ускорителя  $\Delta E/E \leq 2\%$ .

Разработка ускорителя с указанными параметрами в первую очередь связана с решением задачи создания мощных высоковольтных генераторов

прямоугольных импульсов, осуществлением фокусировки пучка с большой объемной плотностью заряда при сравнительно низкой энергии и др.

Ниже рассматривается ряд вопросов, связанных с реализацией СИЛУНДа.

### 1. Высоковольтная импульсная система

Высоковольтная импульсная система СИЛУНДа состоит из двадцати четырех генераторов, содержащих накопитель, управляемый коммутатор и корректор формы импульсов. Нагрузкой каждого генератора являются 3 индуктора, эквивалентные нелинейной индуктивности с активными потерями, и ускоряемый пучок. Исходя из заданных параметров пучка, определим необходимые параметры генератора: напряжение на нагрузке  $U \cong 42$  кВ, ток нагрузки  $I_H > 6$  кА, длительность плоской вершины импульса  $\tau \cong 20$  нсек.

Потребуем также, чтобы крутизна нарастания тока на нагрузке превышала  $10^{12}$  А/сек (длительность фронта импульса  $t_f \approx 5 \cdot 10^{-9}$  сек).

Формирование мощных импульсов с фронтами  $\approx 10^{-9}$  сек без дополнительной коррекции можно осуществить<sup>/3/</sup>, применяя для коммутации малоиндуктивные разрядники и используя накопители с распределенными параметрами. Основным недостатком таких устройств является недолговечность разрядника.

В результате проведенных испытаний установлено, что мощные водородные тиратроны способны стабильно работать в режиме коммутации импульсов тока длительностью до  $10^{-6}$  сек и амплитудой 10–12 кА на частотах повторения до 50 Гц, однако максимальная крутизна нарастания тока при этом существенно ниже требуемой.

Увеличить крутизну нарастания тока возможно, применяя дополнительную коррекцию фронта импульса на нагрузке. Для коррекции использовалось явление укорочения фронта импульса, возникающее при распространении его в нелинейной среде, например, в коаксиальной линии, заполненной ферритом<sup>/4/</sup>. Экспериментально были подобраны следующие параметры линии: длина 75 см, отношение диаметров коаксиала 1,8, марка феррита 400НН.

Для сокращения количества генераторов необходимо, чтобы коммутируемая тиратроном мощность полностью передавалась в нагрузку, т.е. внутреннее сопротивление формирующего устройства должно быть гораздо мень-

ше сопротивления нагрузки. Этому условию можно удовлетворить, применяя в качестве накопителя блок высокочастотных конденсаторов, суммарная емкость которых легко рассчитывается из энергетических соображений и в нашем случае составляет  $(3,0+3,5) \cdot 10^4$  пф.

Принципиальная схема генератора (импульсного модулятора) показана на рис. 1. На рис. 2 приведена осциллограмма импульса, получаемого на нагрузке. Формирование длительности импульса происходит автоматически за счёт нелинейных свойств нагрузки, а коррекция плоской вершины осуществляется подбором величины и знака начальной намагниченности ферритов в корректирующей линии.

## 2. Индуктор

Элемент, создающий необходимое для ускорения частиц вихревое электрическое поле, — индуктор представляет собой импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 1, выполненный на тороидальном сердечнике из ферромагнитного материала. На первичную одновитковую обмотку индуктора подается импульс от генератора, описанного в предыдущем разделе.

В качестве материала для сердечника индуктора использован феррит. В ферритах вследствие их большого электрического сопротивления поверхностный эффект<sup>/5/</sup> пренебрежимо мал и в динамическом режиме величина приращения индукции  $\Delta B$ , определяющая при заданных параметрах (напряжении  $U$  и длительности  $\tau_{\text{имп}}$ ) импульса необходимое поперечное сечение магнитопровода, мало отличается от своего статического значения. Проведенные исследования показали, что для ферритов типа 300НН при отношении наружного диаметра к внутреннему 1,65 величина  $\Delta B \approx 6000$  гс. При этом для  $U = 42$  кв,  $\tau_{\text{имп}} = 20$  нсек необходимое сечение сердечника составляет  $14 \text{ см}^2$ . Если принять ширину кольца  $a = 4$  см, а внутренний диаметр  $d_{\text{вн}} = 11$  см (что диктуется соображениями выбора диаметра ускорительной трубки и радиального размера фокусирующей катушки), наружный диаметр кольца будет  $d_{\text{н}} = 18$  см.

Намагничивающий ток индуктора может быть приближенно оценен на основании заданных параметров импульса  $U_{\text{н}}$ ,  $\tau_{\text{имп}}$  и средней величины

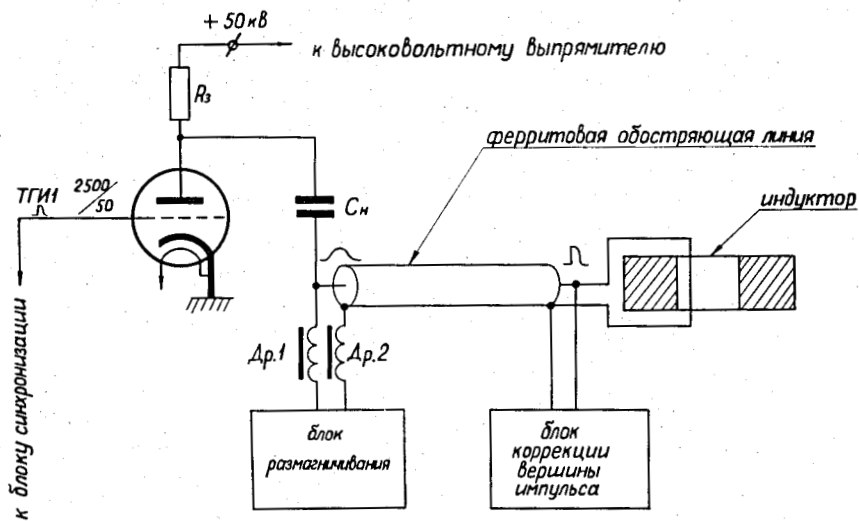


Рис. 1. Принципиальная схема модулятора.

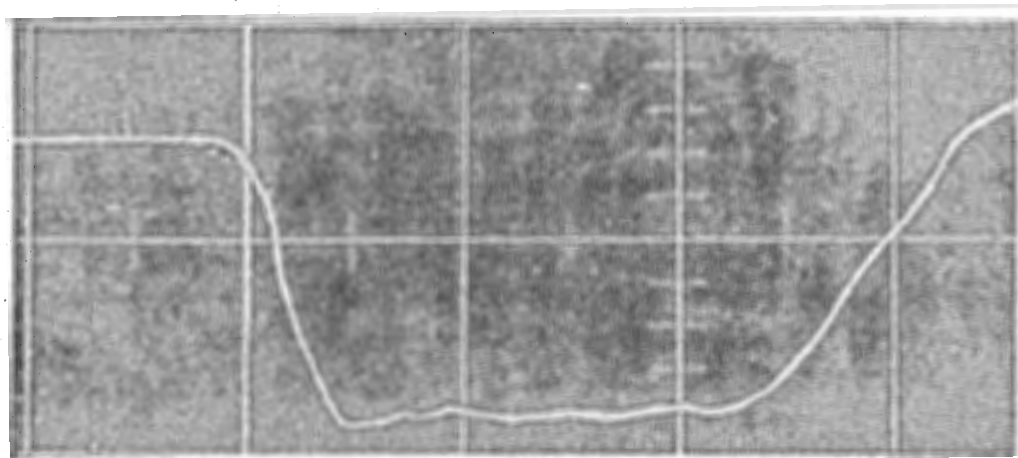


Рис. 2. Осциллограмма импульса на индукторе СИЛУНДа:  $R_n = 24$  ом,  
 $\tau_{\text{разв}} = 20$  нсек/см.

дифференциальной магнитной проницаемости на цикле перемагничивания  $\bar{\mu}\Delta$  и в нашем случае составит 300+350 а. Максимальный градиент ускоряющего поля на оси ускорителя равен 10 кв/см.

Общий вид индуктора показан на рис. 3. Первичная обмотка индуктора выполнена в виде трех симметрично расположенных витков, охватывающих сердечник. Концы витков закреплены на высоковольтных разъемах, размещенных в радиальных отверстиях металлического каркаса индуктора. Коаксиально внутренней окружности сердечника расположена катушка магнитного поля, о которой будет сказано ниже. Сердечник с возбуждающими витками и фокусирующая катушка закрепляются в каркасе посредством заливки эпоксидным компаундом. Отдельные индукторы объединяются в секции. Ускоряющая секция состоит из 18 индукторов и в рабочем режиме должна обеспечивать прирост энергии пучка на 0,75 Мэв.

### 3. Фокусирующая система

Для фокусировки интенсивных пучков заряженных частиц малых энергий наиболее целесообразно использование соленоидального магнитного поля. Расчёты показывают, что для компенсации кулоновского расталкивания в электронном пучке с током 2000 а, начальным радиусом 1 см при энергии 0,5 Мэв необходимо создание продольного магнитного поля на оси ускорителя напряженностью  $2 \cdot 10^3$  э. Для создания такого поля в длинном соленоиде потребуется иметь 1600 а·вит/см. Поскольку радиальный размер фокусирующей катушки не должен превышать 10 мм (вследствие малости внутреннего диаметра сердечника индуктора), то для обеспечения нормального теплового режима питание катушек должно быть импульсным. Одна из возможных схем питания приведена на рис. 4. Преимущество схемы заключается в том, что потребляемая ею от внешнего источника мощность минимальна.

Фокусирующие катушки изготавливаются однослойными, сечение провода 16 мм<sup>2</sup>. Каждая отдельная катушка содержит 8 витков диаметром 80 мм; все фокусирующие катушки секции соединены последовательно. При частоте следования импульсов 50 гц необходимо принудительное охлаждение катушек.

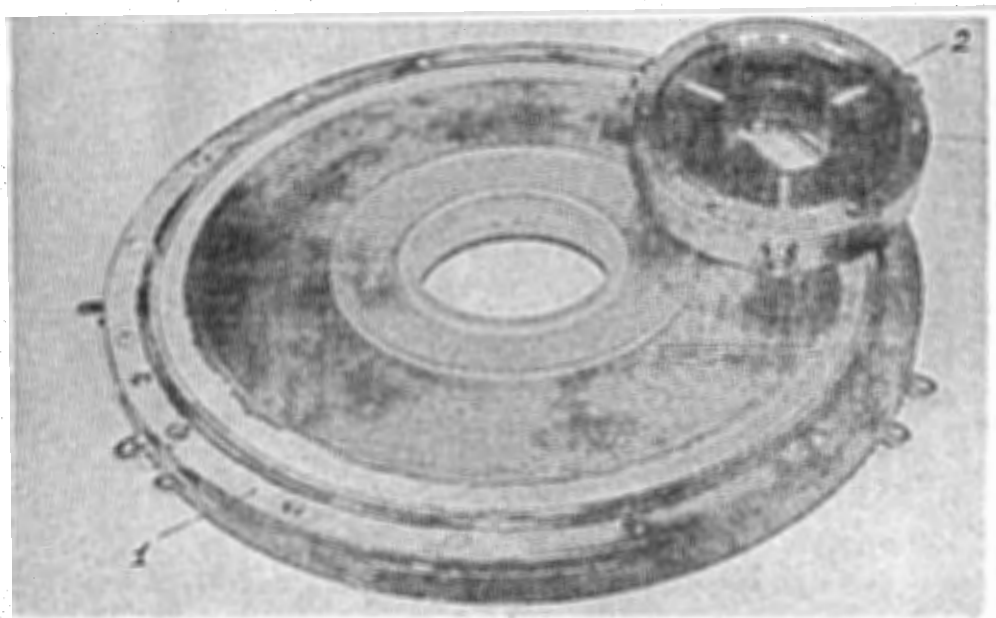


Рис. 3. Вид индуктора: 1 - ЛИУ-3000; 2 - СИЛУНДА.

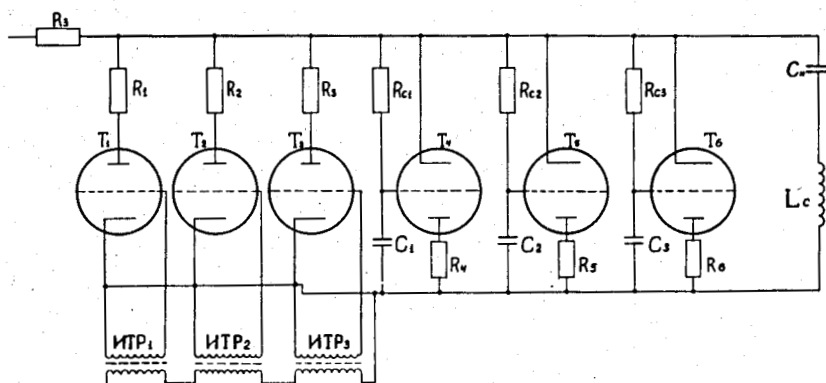


Рис. 4. Схема питания соленоида.



К настоящему времени произведен запуск секции СИЛУНДа, на которой получен ускоренный пучок электронов с током 1600 а, энергией 0,6 Мэв и длительностью 20 нсек.

### Литература

1. Кристофилос и др. Труды Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1963.
2. А. Анацкий и др. Линейный индукционный ускоритель электронов. АЭ, т. 21, вып. 6, декабрь 1966.
3. R.C. Fletcher. "Production and Measurement of Ultra-High Speed Impulses". Rev. Scient. Instr. Vol. 20, No. 12, December, 1949.
4. И.Г. Катаев. Ударные электромагнитные волны. Изд-во "Советское радио", 1963 г.
5. М.Г. Витков. "Расчёт импульсных параметров ферромагнитных пластин и ленточных сердечников". Автоматика и телемеханика, том 13, №12, 1962 г.

Рукопись поступила в издательский отдел

4 февраля 1971 года.