

УДК 621.384.6.93

## Проект линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-Р\*

В. С. Гордеев, Г. А. Мысков,  
Е. С. Михайлов

*Представлен проект ЛИУ-Р, предназначенного для генерации импульса тормозного излучения длительностью ~ 50 нс. Как и установка ЛИУ-10М, ускоритель состоит из инжектора и 16 типовых ускорительных модулей. В качестве инжектора предполагается использовать модификацию ускорителя СТРАУС-Р, разработанного на базе пятикаскадной двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) диаметром 1,2 м с водяной изоляцией. Индукторы будут выполнены на базе четырехкаскадной ДСФЛ диаметром 1 м. Электронный пучок предполагается ускорять до энергии ~30 МэВ при темпе ускорения ~1 МэВ/м.*

### Введение

В последние годы во многих странах (США, Великобритания, Франция, Китай, Россия) ведутся интенсивные работы по созданию ускорителей электронов разного типа, предназначенных для рентгенографии быстропротекающих процессов и способных генерировать мощные импульсы тормозного излучения длительностью не более 100 нс при фокусировке электронного пучка на мишени в пятно диаметром несколько мм и менее. Для этих целей используются ускорители разных типов (ЛИУ на базе индукторов с ферромагнитными сердечниками или сердечниками из метгласа, ускорители с применением технологии индуктивного суммирования напряжения, линейные высокочастотные ускорители электронов, импульсные ускорители прямого действия, безжелезные бетатроны). Результаты работ достаточно подробно освещаются в научно-технической литературе (см., например, обзор [1] и приведенные там ссылки).

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что каждая из лабораторий, участвующая в создании таких ускорителей, ориентируется, как правило, на установки определенного типа. Это объясняется тем, что создание любого из таких ускорителей основывается на использовании освоенных в этих лабораториях специальных технологий, практическая реализация которых занимает многие годы и требует больших материальных затрат.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ в течение нескольких десятилетий накоплен большой опыт создания и эксплуатации безжелезных линейных индукционных ускорителей с индукторами на основе передающих линий с водяной изоляцией [2, 3]. Основными узлами ускоряющей системы таких установок являются: инжектор и серия последовательно установленных однотипных ускорительных модулей (индукторов), где происходит формирование и ускорение электронного пучка, тракта транспортировки пучка к месту проведения экспериментов и, при необходимости, фокусирующее устройство. Для удержания пучка от радиального расширения под действием сил объемного заряда в приосевой области по всей длине ускорителя создается импульсное однородное продольное магнитное поле.

В ускорителях ЛИУ-10, ЛИУ-10М и ЛИУ-30 формируются трубчатые электронные пучки диаметром 60–200 мм с током 30–100 кА, которые при граничной энергии ускорения 14–40 МэВ генерируют мощные импульсы тормозного излучения с относительно короткой длительностью 10–20 нс. Индукция магнитного поля в ускорительном тракте составляет 0,5–0,6 Тл.

\*Докл. на XIX Межд. семинаре по ускорителям заряженных частиц, г. Алушта, 12–18 сент. 2005 г.

Ускорители такого типа могут быть использованы и в интересах исследования быстропротекающих процессов. Ниже кратко описан проект мощного рентгенографического ускорителя ЛИУ-Р.

### Индуктор ЛИУ-Р

В результате анализа результатов большой серии расчетов для формирования импульсов ускоряющего напряжения в установке ЛИУ-Р были выбраны индукторы на основе ступенчатых формирующих линий, выполненных с использованием цилиндрических коаксиальных линий с водяной изоляцией [2, 4]. Индуктор выполнен по схеме четырехкаскадной ДСФЛ, показанной на рис. 1.

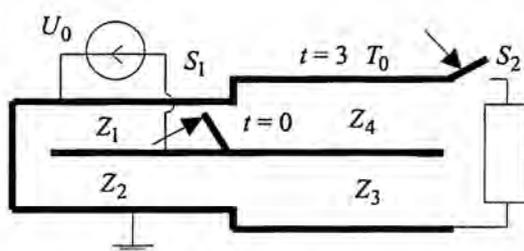


Рис. 1. Электрическая схема индуктора ЛИУ-Р

При замыкании коммутатора  $S_1$  на выходе заряженного до напряжения  $U_0$  индуктора, начиная с момента времени  $T_0$ , формируются импульсы напряжения чередующейся полярности длительностью  $2T_0$ , которые имеют в идеализированном случае прямоугольную форму. Здесь  $T_0$  – электрическая длина отдельного каскада. Рабочим является второй импульс напряжения. При соотношении импедансов  $Z_1 : Z_2 : Z_3 : Z_4 = 1 : 3 : 6 : 2$  такая схема обладает в идеальном случае 100%-ным КПД и в согласованном режиме обеспечивает повышение выходного напряжения по сравнению с зарядным напряжением линии в 2 раза, а в режиме холостого хода – в 4 раза. Данная схема была ранее успешно использована при создании 16 индукторов ускорителя ЛИУ-10М [4].

На рис. 2 приведена конструктивная схема индуктора. ДСФЛ образована коаксиальными цилиндрическими линиями 1–4 с водяной изоляцией, размещенными последовательно по радиусу в корпусе диаметром 1 м и длиной 1,3 м. Выходной импеданс ДСФЛ – 7 Ом. На внешнем диаметре ДСФЛ установлен управляемый многоканальный коммутатор, образованный 18 газонаполненными искровыми разрядниками 5. Ускорительная трубка 8 выполнена в виде полиэтиленовой трубы и установленного внутри секционированного изолятора, между которыми расположен трубчатый слой водного раствора NaCl. Объем между ускорительной трубкой, разделительной полиэтиленовой диафрагмой 6 и металлическим конусом 9 заполнен трансформаторным маслом. Полный осевой размер индуктора ~ 1,8 м.

Электронный пучок с диаметром  $\leq 20$  мм распространяется в приосевом вакуумном канале диаметром 60 мм. С помощью соленоида 7 в вакуумном канале во время ускорения пучка создается достаточно однородное по длине продольное магнитное поле с индукцией 1,5–2 Тл. Импульсная зарядка ДСФЛ до напряжения ~ 500 кВ будет осуществляться от шестикаскадного генератора Маркса с электрической емкостью в ударе 135 нФ, использующего в каждом каскаде по два конденсатора ИЭПМ-100-0,4.

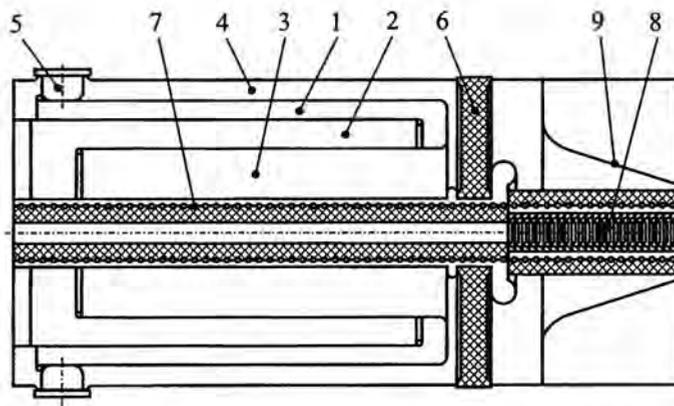


Рис. 2. Конструктивная схема индуктора ЛИУ-Р

### Инжектор ЛИУ-Р

Выбор электрической и конструктивной схем для инжектора в значительной мере зависел от выбора соответствующих схем для индукторов установки ЛИУ-Р. В результате анализа разных вариантов для формирования высоковольтного импульса в инжекторе выбрана электрическая схема пятикаскадной ДСФЛ (рис. 3), которая обладает в идеальном случае 100%-ным КПД при соотношении импедансов  $Z_1 : Z_2 : Z_3 : Z_4 : Z_5 = 1 : 3 : 3,75 : 1,25 : 15$ . В согласованном режиме работы напряжение на выходе ДСФЛ возрастает в 3 раза по сравнению с зарядным напряжением линии, а в режиме холостого хода – в 6 раз. Данная схема была ранее успешно использована при создании ускорителей СТРАУС, СТРАУС-2 и инжектора установки ЛИУ-10М [4].

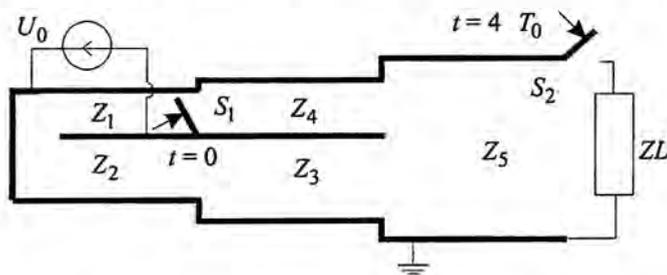


Рис. 3. Электрическая схема инжектора ЛИУ-Р

Упрощенная конструктивная схема инжектора приведена на рис. 4. ДСФЛ образована цилиндрическими коаксиальными линиями с водяной изоляцией 1–5, размещенными в корпусе диаметром 1,2 м. Выходной импеданс ДСФЛ – 18 Ом. На внешнем диаметре корпуса установлен управляемый многоканальный коммутатор, образованный 20 газонаполненными искровыми разрядниками 6. Ускорительная трубка 9 по конструкции аналогична ускорительной трубке индуктора. Объем между ускорительной трубкой, разделительной полиэтиленовой диафрагмой 7 и конусом 12 заполнен трансформаторным маслом.

Во внутреннем вакуумном объеме ускорительной трубки размещен катододержатель 10 и цилиндрический катод, эмитирующая кромка которого вынесена в выходную камеру 11. При включении коммутатора 6 на выходе ДСФЛ формируются импульсы напряжения чередующейся полярности. Рабочим является второй импульс, а первый отсекается от ускорительной трубки одноканальным управляемым газонаполненным предимпульсным разрядником 8. Необходимое распределение магнитного поля в области вакуумного диода создается с помощью импульсных соленоидов 12 и 13. Полный осевой размер инжектора  $\sim 4,5$  м.

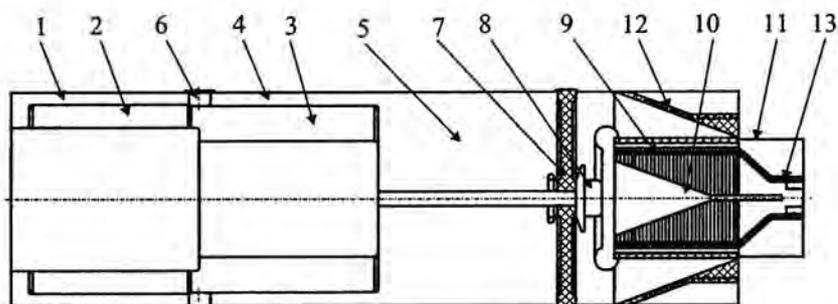


Рис. 4. Конструктивная схема инжектора ЛИУ-Р

Зарядка ДСФЛ до рабочего напряжения  $\leq 650$  кВ за время 0,8 мкс будет производиться от 8-каскадного генератора Маркса с электрической емкостью в ударе 100 нФ, использующего в каждом каскаде по два конденсатора ИЭПМ-100-0,4.

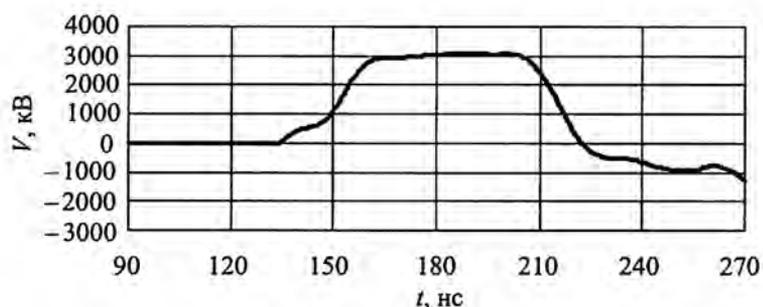
### Ускоряющая система ЛИУ-Р

В разработанном проекте ускоряющую систему ЛИУ-Р предполагается выполнить в составе инжектора, 16 типовых ускорительных модулей, тракта транспортировки электронного пучка и выходного фокусирующего устройства. По своему составу и внешнему виду ускоряющая система ЛИУ-Р близка аналогичной системе ускорителя ЛИУ-10М, но отличается увеличенными осевыми размерами инжектора и индукторов.

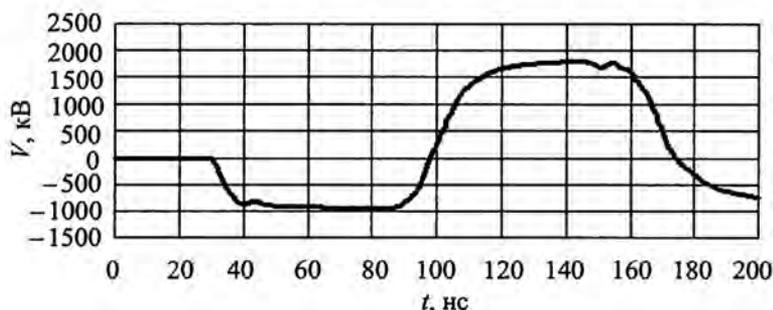
Особенностью ускорителя ЛИУ-Р, по сравнению с созданными ранее безжелезными ЛИУ, является необходимость фокусировки пучка на выходе установки в пятно малого размера. С учетом принятой в установках такого типа схемой инжекции, ускорения и транспортировки пучка в однородном продольном магнитном поле такой режим работы накладывает ограничения на максимальный диаметр инжектируемого пучка и требует получения на выходе установки электронов с минимальным значением поперечной составляющей импульса. В ЛИУ-Р диаметр пучка не должен превышать 20 мм. Кроме того, по условиям применения ЛИУ-Р может иметь значительно большую, до 100 нс, длительность импульса. Показано, что при реализации ускорителя на базе описанных выше схемных решений оптимальная длительность импульса тормозного излучения на половине высоты составляет 45–50 нс при длительности токового импульса  $\sim 60$  нс. Это явилось причиной отказа от использования в индукторах радиальных линий. Значительное вни-

мание должно быть уделено также повышению надежности работы установки и точной юстировке ускоряющей системы.

Согласно результатам численного моделирования, инжектор должен обеспечить формирование электронного пучка с током 10–20 кА при внешнем диаметре 10–20 мм и граничной энергии электронов 3–3,3 МэВ. Расчетная форма импульса ускоряющего напряжения инжектора приведена на рис. 5,а. Длительность импульса ускоряющего напряжения на уровне 0,5 от амплитудного значения составляла 60 нс, на уровне 0,9–50 нс [5].



а



б

Рис. 5. Расчетная форма импульсов ускоряющего напряжения инжектора (а) и индуктора (б)

Сформированный в инжекторе электронный поток будет ускоряться в вакуумном тракте диаметром 60 мм при индукции продольного магнитного поля 1,5–2 Тл. На выходе каждого индуктора должен генерироваться импульс ускоряющего напряжения амплитудой 1,75–1,65 МВ (при токе 10–20 кА) с длительностью на уровне 0,5 от амплитудного значения 63 нс, на уровне 0,9–43 нс (рис. 5,б). Имеется возможность изменения в определенных пределах амплитуды ускоряющего напряжения за счет варьирования зарядного напряжения индуктора и сопротивления электролитической нагрузки ускорительной трубки.

На выходе ускорителя диаметр пучка электронов с максимальной энергией частиц около 30 МэВ будет уменьшаться в ~ 4 раза на длине ~ 1 м за счет использования сильного нарастающего магнитного поля с максимальной индукцией ~ 30 Тл. Согласно расчетам, доза тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени должна составить от 2000 до 4000 Р.

Преимуществом предложенного варианта рентгенографического ускорителя является возможность получения достаточно больших импульсных токов и доз тормозного излучения и, что более важно для установки ЛИУ-Р, слабая зависимость размеров фокусного пятна от энергии электронов на выходе ускорителя. К недостаткам следует отнести сравнительно большой энергозапас конденсаторной батареи, используемой для создания импульсного магнитного поля в ускорителе.

Реализация разработанного проекта осуществляется в несколько этапов. На первом этапе в 2003 г. создан прототип инжектора – импульсный ускоритель электронов СТРАУС-Р [6]. Он используется как самостоятельный рентгенографический ускоритель и обеспечивает получение на мишени фокусного пятна диаметром  $\leq 4$  мм при максимальной дозе тормозного излучения 27 Р на расстоянии 1 м от выходного фланца. Граничная энергия электронов составляет 3,0–3,5 МэВ, ток пучка  $\leq 60$  кА, длительность импульса тормозного излучения  $\leq 50$  нс. Определенные экспериментально характеристики ускорителя соответствуют проектным параметрам.

В настоящее время завершается создание макета ЛИУ-Р с энергией ускорения  $\sim 10$  МэВ в составе инжектора, четырех ускорительных модулей, тракта транспортировки и фокусирующего устройства (рис. 6). Полученные здесь экспериментальные результаты будут учтены при создании полномасштабного ускорителя ЛИУ-Р с энергией ускорения  $\sim 30$  МэВ.

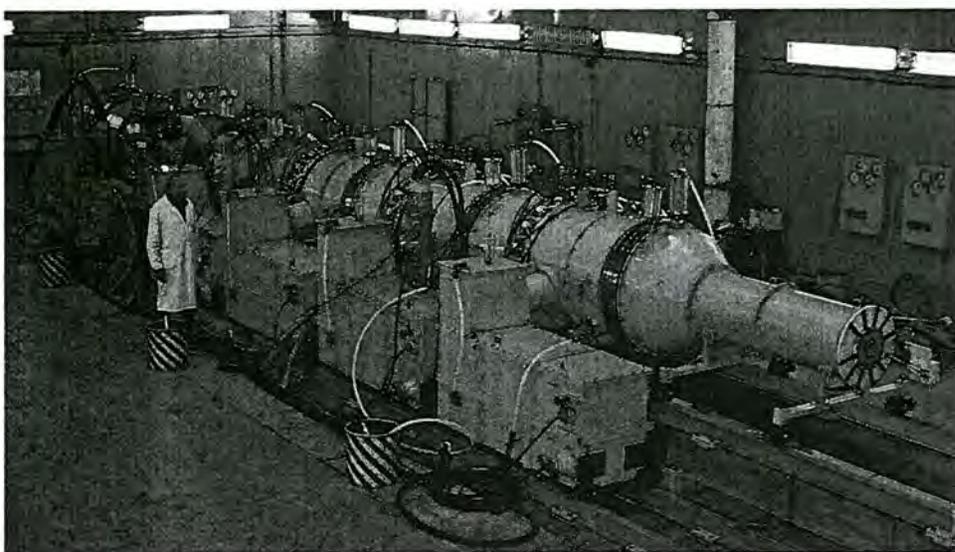


Рис. 6. Общий вид макета ЛИУ-Р, зафиксированный в процессе пробной сборки установки

### Список литературы

1. Ekdahl C. Modern Electron Accelerators for Radiography // IEEE Trans. on Plasma Science. 2002. Vol. 30, N 1. P. 254–261.
2. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Гордеев В. С. Безжелезные линейные индукционные ускорители электронов – мощные генераторы коротких импульсов тормозного излучения // Высокие плотности энергии. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1997. С. 107–133.

## УСКОРИТЕЛИ

3. Voinov M. A., Gerasimov A. I., Gordeev V. S. et al. Complexes on the Basis of High-Current Linear Induction Accelerators and Pulse Nuclear Reactors // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1999. Вып. 3. С. 82–84.
4. Гордеев В. С., Басманов В. Ф., Мысков Г. А. и др. Сильноточные импульсные ускорители электронов на базе ступенчатых формирующих линий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров. 2003. Вып. 5. С. 176–181.
5. Gordeev V. S., Mikhailov E. S., Myskov G. A., Laptev D. V. Numerical simulation of the processes of small-diameter high-current electron beam shaping and injection // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 2001, № 5. С. 33–35.
6. Gordeev V. S., Myskov G. A., Basmanov V. F. et al. Pulsed Electron Accelerator STRAUS-R // Proc. 15-th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, BEAMS'2004. Saint-Peterburg, RF. July 18–23. 2004. P. 323–326.

## Design of Linear Induction Electron Accelerator LIA-R

V. S. Gordeev, G. A. Myskov, E. C. Mikhailov

*A design of linear induction electron accelerator LIA-R meant for generation of bremsstrahlung pulse of duration  $\sim 50$  ns at half maximum is presented. As well as a facility LIA-10M the accelerator consists of an injector and 16 standard acceleration modules. As an injector it is supposed to use a modification of STRAUS-R accelerator developed on the basis of five-cascade double stepped forming line (DSFL) of diameter 1.2 m with water insulation. Inductors will be made on the basis of four-cascade DSFL of diameter 1 m. It is expected to accelerate the electron beam up to the energy  $\sim 30$  MeV at the acceleration rate  $\sim 1$  MeV/m.*