

УДК 621.384.6.93

Обзор сильноточных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе ступенчатых линий

В. Ф. Басманов, В. С. Гордеев,
А. В. Гришин, Н. В. Завьялов,
Г. А. Мысков, С. Т. Назаренко

Представлен краткий обзор ускорителей И-3000, СТРАУС, СТРАУС-2, ЛИУ-10М, СТРАУС-Р, ЛИУ-Р-Т и ГАММА-1. Системы формирования высоковольтных импульсов ускоряющего напряжения этих установок выполнены с использованием многокаскадных ступенчатых линий, образованных из отрезков однородных линий со ступенчатым характером изменения импедансов. Такие устройства в результате волновых процессов обеспечивают при высоком кпд повышение в несколько раз выходного напряжения по сравнению с зарядным напряжением линий. Граничная энергия электронов ускорителей находится в диапазоне 2,3–25 МэВ, амплитуда тока пучка 20–750 кА, длительность токового импульса 16–80 нс на полувысоте.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработаны электрические схемы многокаскадных генераторов высоковольтных импульсов на базе ступенчатых линий (СЛ), обеспечивающих в результате волновых процессов значительное (до 5–10 раз) повышение напряжения, тока или мощности [1–3]. При определенном соотношении импедансов каскадов, имеющих, как правило, одинаковую электрическую длину, такие устройства обладают в идеальном случае 100 % кпд. Найдено несколько десятков схем, получено более 20 авторских свидетельств и патентов РФ на изобретения. В период 1981–2012 гг. на базе схем с емкостным накоплением энергии созданы сильноточные ускорители И-3000, СТРАУС, СТРАУС-2, ЛИУ-10М, СТРАУС-Р, ЛИУ-Р-Т и ГАММА-1 (см. табл.), которые используются в основном для генерации импульсов тормозного излучения (ТИ) в радиационных и рентгенографических исследованиях.

Основные характеристики ускорителей, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на основе ступенчатых линий

Ускоритель	И-3000	СТРАУС	СТРАУС-2	ЛИУ-10М	СТРАУС-Р	ЛИУ-Р-Т	ГАММА-1
Энергия, запасаемая в ГИН, кДж	12,5	10	24	180	32	128	160
Зарядное напряжение формирующей линии, кВ	500	530	630	510–630	650	500–650	1000
Число разрядников в формирующей системе, шт.	60	13	21	341	21	93	42

Окончание таблицы

Ускоритель	И-3000	СТРАУС	СТРАУС-2	ЛИУ-10М	СТРАУС-Р	ЛИУ-Р-Т	ГАММА-1
Граничная энергия ускоренных электронов, МэВ	3,5	2,3	3	20–25	3,7	≤10	2
Амплитуда импульса тока пучка, кА	20	22	50	≤50	50	10–20	750
Длительность импульса тока на полувысоте, нс	16	40	20–40	25	60	60	80
Доза ТИ, Р: – на фланце* – на расстоянии 1 м от мишени	2000 9	4500 9	10000 20	40000 750	4000 36	≤200	3000 80
Длительность импульса ТИ, нс:	12	32	15÷25	15	50	50	45
Диаметр облучаемого пятна ($D_{max}/D_{min} = 2$), см: – на фланце* – на расстоянии 1 м от мишени	10 100	5 70	8 80	8,5 55	6 60		10

Примечание: * для ускорителя ГАММА-1 доза ТИ и диаметр облучаемого пятна приведены на расстоянии 5 см от мишени.

Ускоритель И-3000

В 1981 г. на основе двух инжекторных модулей ЛИУ-10 [4] создан ускоритель И-3000 с габаритами 3,5×3,7×2,3(н) м. На рис. 1 показана идеализированная электрическая схема трехкаскадной двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ), а на рис. 2 – конструктивная схема высоковольтной части ускорителя. Для увеличения напряжения, генерируемого группой из шести индукторов, использована высокоимпедансная вакуумная передающая линия (ПЛ). При работе на втором импульсе ускоряющего напряжения это позволило повысить энергию электронов в 2,3 раза. Отметим, что именно результаты экспериментальных исследований на установке И-3000 стимулировали развитие во ВНИИЭФ теории СЛ.

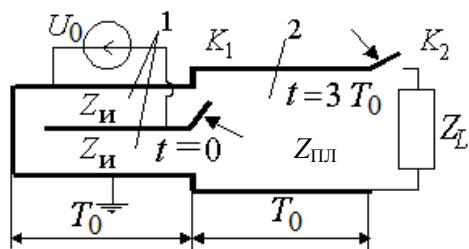


Рис. 1. Электрическая схема подключения нагрузки к индуктору (группе индукторов) (1) через однородную ПЛ (2)

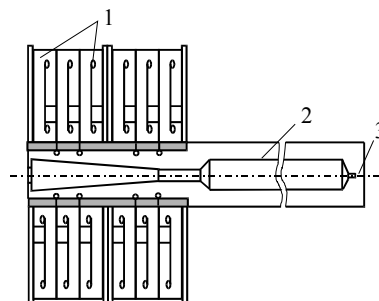


Рис. 2. Конструктивная схема высоковольтной части ускорителя И-3000: 1 – инжекторный блок индукторов ЛИУ-10; 2 – вакуумная ПЛ; 3 – катод

Ускоритель СТРАУС

В 1982 г. создан ускоритель СТРАУС (Ступенчатый ТРАнсформирующий УСкоритель) – первый ускоритель на СЛ с оптимальным соотношением импедансов [2, 5]. На рис. 3 показаны электрическая и конструктивная схемы высоковольтной части ускорителя. Он выполнен по схеме пятикаскадной ДСФЛ, которая при соотношении импедансов $Z_1:Z_2:Z_3:Z_4:Z_5 = 1:3:15/4:5/4:15$ обеспечивает в режиме холостого хода повышение выходного напряжения в 6 раз. Выходной импеданс ДСФЛ (1–5), размещенной в баке ($\varnothing = 0,8$ м, $\ell = 2,9$ м), составляет 16 Ом. На внешнем диаметре ДСФЛ установлен управляемый коммутатор, образованный 12 газонаполненными разрядниками 6. Электрическая длина водоизолированных линий $T_0 = 20$ нс. Ускорительная трубка выполнена на основе секционированного изолятора 10. Полость между секционированным изолятором и полиэтиленовой трубкой 9 заполнена электролитом 11 (водный раствор NaCl), а объем между ускорительной трубкой и полиэтиленовой диафрагмой 7 – трансформаторным маслом. Диодный узел 12 подключается к ДСФЛ в требуемый момент времени через одноканальный управляемый газонаполненный предимпульсный разрядник 8. ДСФЛ заряжается до напряжения ≤ 500 кВ за 0,8 мкс. Форма импульса диодного тока близка к трапецеидальной при $t_{0,5} \approx 40$ нс, $t_{0,9} \approx 20$ нс.

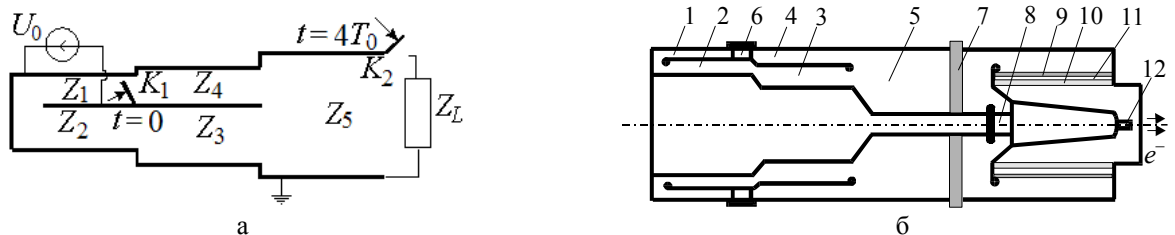


Рис. 3. Электрическая (а) и конструктивная (б) схемы высоковольтной части ускорителя СТРАУС

Результаты экспериментов на ускорителе полностью подтвердили выводы теоретического анализа для устройств на СЛ. Наряду с высоким коэффициентом трансформации напряжения подтверждена возможность формирования импульса напряжения с плоской вершиной. По сравнению с И-3000 в ускорителе СТРАУС используется один генератор ГИН-500 вместо двух, полное число разрядников в линиях уменьшено с 60 до 13 и предусмотрено рассеяние в электролитической нагрузке энергии, остающейся в линиях после окончания рабочего импульса. В результате заметно повысилась надежность работы ускорителя.

Ускоритель ЛИУ-10М

Ускоряющая система линейного индукционного ускорителя ЛИУ-10М (рис. 4), созданного в 1994 г., состоит из инжектора, 16 ускорительных модулей и тракта транспортировки пучка длиной 4 м с мишенным узлом для генерации импульса ТИ [2, 6]. Размеры ускоряющей системы без тракта транспортировки $12 \times 3,5 \times 2,4$ (h) м. Ускорение и транспортировка пучка осуществляется в импульсном магнитном поле 0,5 Тл. Инжектор, являющийся модификацией ускорителя СТРАУС-2, предназначен для формирования кольцевого пучка электронов. Он выполнен на базе пятикаскадной ДСФЛ ($T_0 = 18$ нс). Отношение импедансов $Z_1:Z_2:Z_3:Z_4:Z_5 = 1,0:2,4:4,0:1,1:22,5$ оптимизировано на режимы инжекции пучка электронов и генерацию ТИ. В идеальном случае отношение выходного напряжения в режиме холостого хода к зарядному напряжению линии со-

ставляет $U_{xx}/U_0 = 7,2$. При зарядке ДСФЛ до 0,63 МВ амплитуда выходного импульса напряжения холостого хода достигает 4,1 МВ ($U_{xx}/U_0 = 6,5$).

На рис. 5 приведена схема высоковольтной части инжектора. ДСФЛ с водяной изоляцией коммутируется 20 управляемыми газонаполненными разрядниками 6. Импедансы линий 1–5 равны 0,8; 1,9; 3,2; 0,9 и 18 Ом соответственно. Для уменьшения длины ДСФЛ линии 1–4 размещены последовательно по радиусу в пределах одного осевого размера. Ускорительная трубка образована полиэтиленовой трубкой 8 и секционированным изолятором 9, полость 10 заливается электролитом. Объем между ускорительной трубкой и полиэтиленовой диафрагмой 11 заполняется трансформаторным маслом. ДСФЛ подключена к ускорительной трубке через одноканальный управляемый разрядник 7. Диаметр ДСФЛ 1,2 м, ее длина с узлом ускорительной трубки и выходной камерой 2,7 м. ДСФЛ заряжается за 0,51 мкс до напряжения ≤ 700 кВ двумя шестикаскадными ГИН с суммарным энергозапасом 24 кДж.

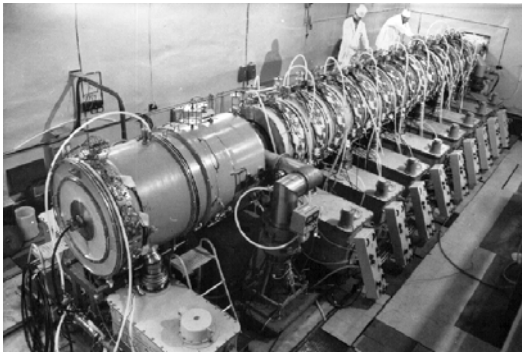


Рис. 4. Ускоритель ЛИУ-10М

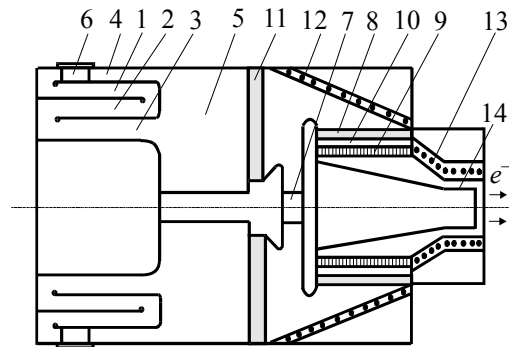


Рис. 5. Конструктивная схема высоковольтной части инжектора

Основными узлами ускорительного модуля являются индуктор (рис. 6,а), генерирующий импульсы ускоряющего напряжения, и ГИН, обеспечивающий его импульсную зарядку. Индуктор выполнен на базе четырехкаскадной ДСФЛ (рис. 6,б), повышающей напряжение в режиме холостого хода в 4 раза. Три отрезка коаксиальных линий 1–3 с импедансами 0,55, 1,65 и 3,3 Ом размещены последовательно по радиусу, а отрезок 4 ($Z_4 = 1,1$ Ом) выполнен в виде однородной радиальной линии. Диаметр индуктора 1,1 м, осевой размер 0,57 м. Коммутация ДСФЛ осуществляется 20 разрядниками 9. Линия заряжается до напряжения ≤ 560 кВ за 0,8 мкс пятикаскадным ГИН с энергозапасом 10 кДж.

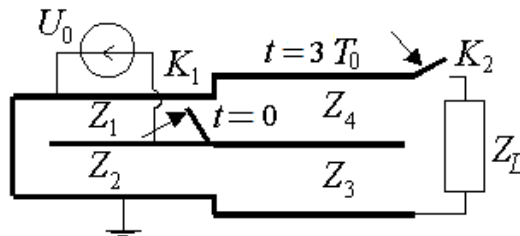
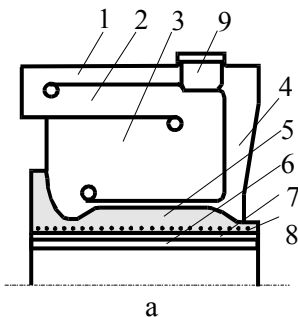


Рис. 6. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы индуктора: 1–4 – водяные линии с импедансами Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 соответственно; 5 – полиэтиленовая труба; 6 – секционированный изолятор; 7 – электролитическая нагрузка; 8 – магнитный соленоид; 9 – разрядник многоканального коммутатора

Ускорительный тракт ЛИУ-10М образован 16 изоляторами индукторов с апертурой 200 мм и общей длиной 9,2 м. Амплитуда первого и второго импульсов напряжения индуктора на нагрузке 60 Ом составляет 1,2 и 2,0 МВ, длительность по основанию – 30 и 34 нс, на полувысоте – 22 нс. При сопротивлении электролитической нагрузки $R_s = 60$ Ом и токе пучка $I_p = 50$ кА амплитуда ускоряющего напряжения составляет 1,6 МВ при темпе ускорения 2,8 МэВ/м.

Ускоритель СТРАУС-2

В отличие от инжектора ЛИУ-10М в ускорителе СТРАУС-2 [1, 2, 7] отсутствуют соленоиды для создания магнитного поля и изменена конфигурация катодного электрода. Выходные напряжение и ток ускорителя регулируются, но наиболее часто реализуется режим $U \approx 3$ МВ, $I \approx 50$ кА, соответствующий максимальному выходу ТИ. Длительность импульса может варьироваться путем изменения времени включения управляемого предимпульсного разрядника. Доза остается практически неизменной при $t_{\text{ТИ}0,5} = 15\text{--}25$ нс, при этом мощность дозы максимальна при $t_{\text{ТИ}0,5} = 15$ нс и по сравнению с режимом $t_{\text{ТИ}0,5} = 25$ нс возрастает в $\sim 1,5$ раза. Постоянство дозы обеспечивается за счет роста диодного тока и напряжения ($\sim 10\text{--}15\%$) при сокращении длительности импульса. Первый ускоритель СТРАУС-2 создан в 1989 г. После проведения исследований по инжекции пучка и генерации импульсов ТИ он используется в качестве инжектора ЛИУ-10М. Во ВНИИЭФ действуют еще два таких ускорителя в составе облучательных комплексов ЛИУ-10М – ГИР2 и ПУЛЬСАР [8].

Ускоритель СТРАУС-Р

Рентгенографический ускоритель СТРАУС-Р, имеющий габаритные размеры 4,7×2,2×2,4 м (рис. 7), запущен в эксплуатацию в 2003 г. [9, 10]. Система формирования высоковольтных импульсов ускоряющего напряжения (рис. 8) выполнена на базе водоизолированной пятикаскадной ДСФЛ с электрической длиной каждого каскада 30 нс и с такими же значениями импедансов, как и в ускорителе СТРАУС-2. Конструктивная схема ДСФЛ аналогична схеме, использованной в установке СТРАУС (см. рис. 3,б). Зарядка ДСФЛ до напряжения ≤ 650 кВ за 0,8 мкс производится от восьмикаскадного генератора Маркса с максимальным энергозапасом 32 кДж. За счет волновых процессов, возникающих при коммутации ДСФЛ двадцатью газонаполненными тригatronами, достигается семикратное (до $\sim 4,5$ МВ в режиме холостого хода) повышение напряжения на выходе ДСФЛ по сравнению с зарядным.

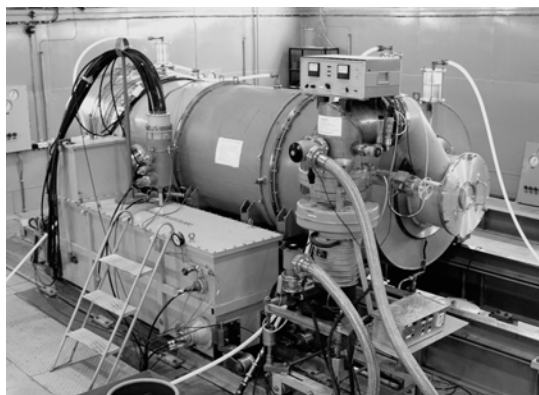


Рис. 7. Ускоритель СТРАУС-Р

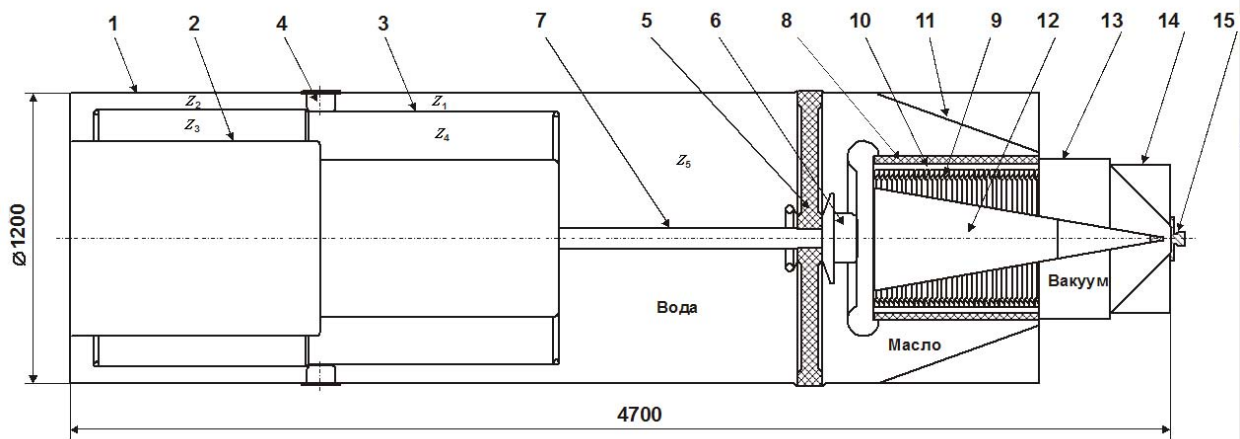


Рис. 8. Конструктивная схема высоковольтной части ускорителя: 1 – корпус; 2 – внутренний (заземленный) электрод ДСФЛ; 3 – высоковольтный электрод ДСФЛ; 4 – многоканальный коммутатор; 5 – разделительная диафрагма; 6 – предимпульсный разрядник; 7 – внутренний электрод выходной линии ДСФЛ; 8 – диэлектрическая труба; 9 – секционированный изолятор; 10 – объем электролитической нагрузки; 11 – конусный электрод; 12 – катододержатель с катодом; 13 – выходная вакуумная камера; 14 – фокусирующее устройство; 15 – анодный фланец с мишенным узлом

В рентгенографическом режиме работы фокусировка электронного пучка происходит под действием его собственных электромагнитных полей. При ускоряющем напряжении 3,3 МВ и амплитуде импульса тока 60 кА доза ТИ на расстоянии 1 м от мишени составляет 27 Р при длительности импульса на полувысоте 50 нс и диаметре фокусного пятна на мишени ≤ 4 мм. Просвечивающая возможность по стали на этом расстоянии – 250 мм. После каждого импульса необходима замена мишени и алюминиевого фильтра-поглотителя электронов.

При работе в облучательном режиме используется конфигурация диода ускорителя, аналогичная применяемой на установке СТРАУС-2. Доза ТИ на расстоянии 1 м от мишени составляет 36 Р. Остальные характеристики приведены в таблице. При необходимости имеется возможность укорочения длительности импульса ТИ с 50 до 20 нс за счет увеличения временной задержки срабатывания предимпульсного разрядника.

Ускоритель ЛИУ-Р-Т

Ускоритель ЛИУ-Р-Т (линейный индукционный ускоритель рентгенографический тестовый) создан в 2007 г. в рамках работ по проекту создания мощного рентгенографического ускорителя ЛИУ-Р (30 МэВ, 20 кА, 60 нс) [11, 12] и представляет собой лабораторную установку для исследования процессов формирования, ускорения и фокусировки малоапертурных сильноточных электронных пучков. Он также может использоваться в качестве мощного источника тормозного излучения для импульсной рентгенографии быстропротекающих процессов и для исследований в области радиационной физики.

Общий вид ускорителя ЛИУ-Р-Т представлен на рис. 9, его основные параметры приведены в таблице. Габаритные размеры ускорителя $15,0 \times 2,2 \times 2,4(h)$ м³. Ускоряющая система ЛИУ-Р-Т в существующей конфигурации состоит из инжектора и 4 однотипных индукторов. В качестве инжектора используется ускоритель СТРАУС-Р с модифицированным диодным узлом, обеспечивающим формирование кольцевого электронного пучка диаметром 8–20 мм с энергией 3–3,5 МэВ и током 10–20 кА в импульсе длительностью 60 нс на половине максимума.

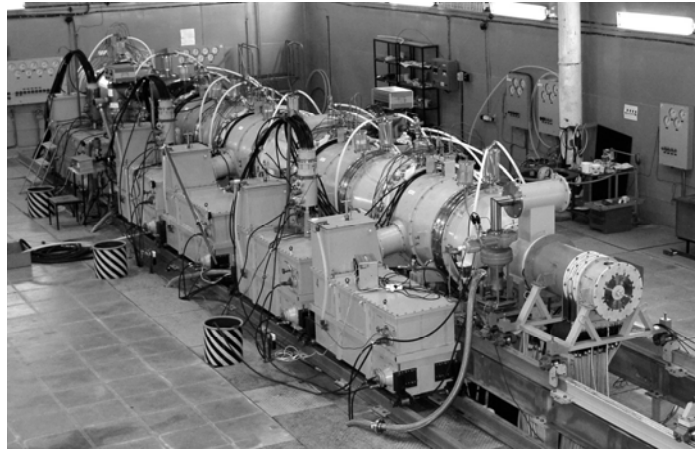


Рис. 9. Ускоритель ЛИУ-Р-Т

Конструктивная схема индуктора показана на рис. 10. Как и в ускорителе ЛИУ-10М, он выполнен по схеме четырехкаскадной ДСФЛ (см. рис. 6,б), обеспечивающей в идеальном случае повышение выходного напряжения по сравнению с зарядным в 4 раза в режиме холостого хода. Все отрезки ДСФЛ имеют приблизительно одинаковую электрическую длину $T_0 \approx 35$ нс, их импедансы равны $Z_1 = Z_2 = 1,0$ Ом, $Z_3 = 2,0$ Ом и $Z_4 = 6,0$ Ом. Зарядка ДСФЛ до напряжения 500–530 кВ осуществляется от шестикаскадного генератора Аркадьева – Маркса с максимальным энергозапасом 24 кДж, а ее коммутация производится восемнадцатью газонаполненными управляемыми искровыми разрядниками тригatronного типа. При этом на выходе индуктора формируется цуг импульсов напряжения чередующейся полярности с длительностью на полувысоте 65–70 нс. Для ускорения электронного пучка используется второй импульс отрицательной полярности с амплитудой 1,5–1,7 МВ.

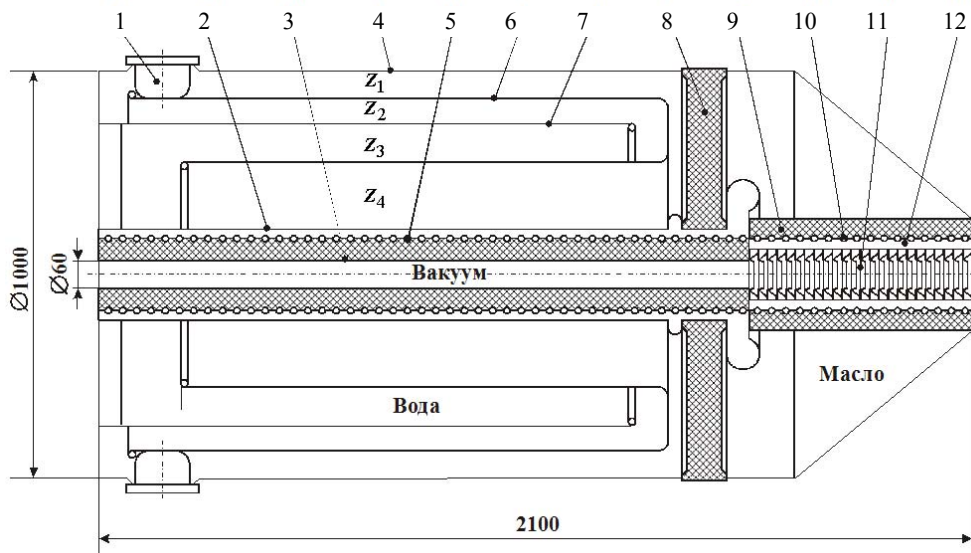


Рис. 10. Конструктивная схема индуктора ЛИУ-Р-Т: 1 – многоканальный коммутатор; 2 – внутренний электрод ДСФЛ; 3 – труба дрейфа; 4 – корпус; 5 – соленоид трубы дрейфа; 6 – высоковольтный электрод ДСФЛ; 7 – заземленный электрод ДСФЛ; 8 – разделительная диафрагма; 9 – диэлектрическая труба; 10 – соленоид ускорительной трубки; 11 – секционированный изолятор; 12 – объем резистивной нагрузки

Сформированный инжектором пучок электронов транспортируется в продольном магнитном поле с индукцией ~ 2 Тл по ускорительным трактам индукторов, наращивая в процессе ускорения свою энергию до 9–10 МэВ, и затем попадает в фокусирующее устройство, где происходит его адиабатическое сжатие в плавно нарастающем до ~ 32 Тл магнитном поле до диаметра 3–5 мм на мишени. Мишенью служит танталовый диск толщиной 1,5–2 мм в комбинации с полиэтиленовым фильтром-поглотителем деградированных электронов толщиной до 60 мм. В режиме фокусировки электронного пучка доза ТИ составляет 160–170 Р на расстоянии 1 м от мишени ускорителя. При отсутствии фокусировки (в случае размещения мишенного узла в области однородного магнитного поля) доза возрастает до 200–210 Р. В обоих случаях после каждого импульса требуется замена мишени вследствие разрушения ее центральной части.

К настоящему времени на ускорителе ЛИУ-Р-Т произведено около 450 рабочих импульсов при различном составе и режиме функционирования его ускоряющей системы. Накоплен большой объем экспериментальных данных, детально изучены особенности работы с малоапертурными электронными пучками высокой интенсивности. Полученный опыт весьма актуален при создании перспективных электронных ускорителей высокой мощности для целей импульсной рентгенографии быстротекущих процессов и других прикладных задач.

Ускоритель ГАММА-1

В конце 2005 г. во ВНИИЭФ были завершены работы по изготовлению и монтажу высокоточного импульсного ускорителя электронов ГАММА-1, предназначенного для проведения исследований в области радиационной физики. Он может использоваться как самостоятельно, так и в составе многомодульной установки подобно американской установке ДЕКАДА [13]. Расчетно-теоретическое обоснование и описание проекта ускорителя приведено в работах [14, 15]. В настоящее время данный ускоритель (рис. 11) среди установок на СЛ обладает самым большим выходным током.

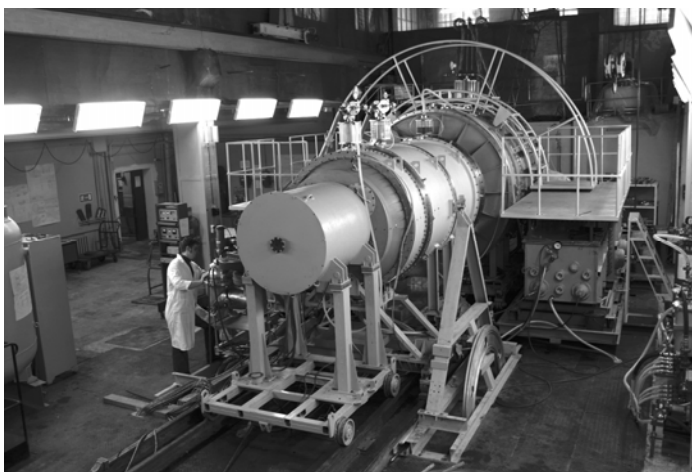


Рис. 11. Ускоритель ГАММА-1 с подвижным блоком свинцовой защиты

На рис. 12 представлены электрическая и конструктивная схемы высоковольтной части ускорителя. Установка создана на базе пятикаскадной ДСФЛ (см. рис. 3,а) с электрической длиной каскадов T_0 и двухкаскадного преобразователя длительности с электрической длиной линий $T_0/2$.

Причем в рассматриваемом варианте преобразователь длительности встроен в выходной каскад ДСФЛ. При соотношении импедансов, указанном выше для ускорителя СТРАУС, такое устройство в идеальном случае обладает 100 %-ным КПД. Пятикаскадная ДСФЛ за счет волновых процессов в согласованном режиме работы обеспечивает повышение выходного напряжения по сравнению с зарядным напряжением линий в 3 раза. Преобразователь длительности, оставляя неизменным напряжение, повышает ток и электрическую мощность в согласованной нагрузке в 2 раза за счет сокращения в такое же число раз длительности импульса.

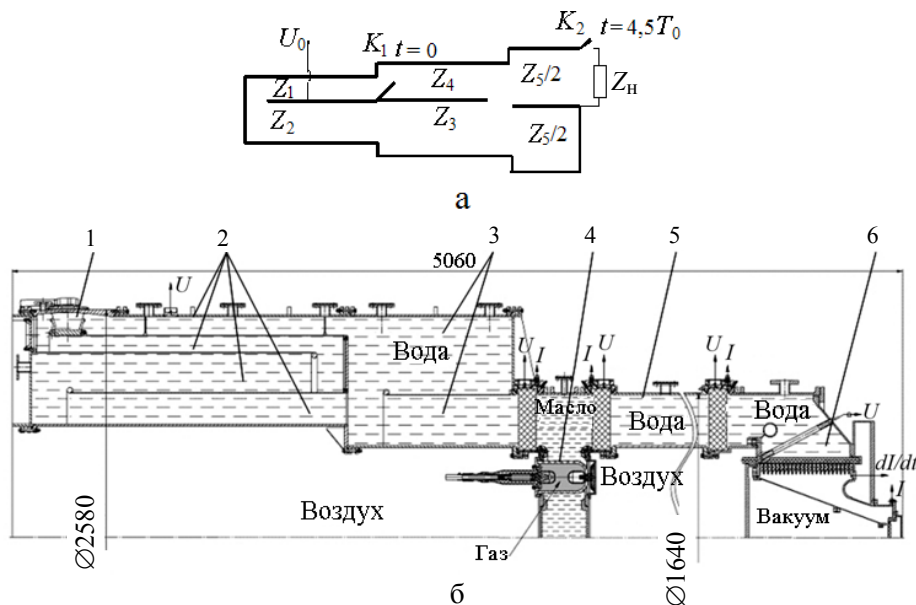


Рис. 12. Электрическая (а) и конструктивная (б) схемы высоковольтной части ускорителя ГАММА-1: 1 – разрядник многоканального коммутатора ДСФЛ; 2 – первые четыре каскада ДСФЛ; 3 – выходной каскад ДСФЛ со встроенным преобразователем длительности; 4 – разрядник ПК; 5 – ВПЛ; 6 – узел ускорительной трубки

Схема ДСФЛ допускает варьирование в определенных пределах соотношения импедансов при сохранении высокого КПД. Для формирующей системы с зарядным напряжением 1 МВ выбраны следующие импедансы: $Z_2 = Z_3 = 2,8Z_1$, $Z_4 = Z_1$, $Z_5 = 10Z_1$. Выходное сопротивление генератора с преобразователем составляет $Z_5/2 = 2,9$ Ом. В идеальном случае напряжение на согласованной нагрузке должно превышать зарядное напряжение ДСФЛ в 2,58 раза при КПД = 98 %.

Ускоритель работает следующим образом. Четыре каскада ДСФЛ за время $\leq 0,9$ мкс заряжаются до напряжения ≤ 1 МВ от двух одинаковых включенных параллельно генераторов Аркадьева – Маркса ГИН-1000 с общим энергозапасом 160 кДж. При достижении максимального зарядного напряжения линий включается многоканальный коммутатор ДСФЛ. Он образован 36 равномерно распределенными по окружности на внешнем диаметре корпуса ДСФЛ отдельными газонаполненными разрядниками тригatronного типа. В результате волновых процессов на выходе ДСФЛ формируются импульсы напряжения чередующейся полярности. Рабочим является второй импульс. В требуемый момент времени подаются пусковые импульсы на многоканальный предимпульсный коммутатор (ПК), образованный шестью газонаполненными разрядниками тригatronного типа. При срабатывании предимпульсного коммутатора энергия из ДСФЛ по водяной передающей линии (ВПЛ) передается к ускорительной трубке с сильноточным вакуумным дио-

дом. Здесь формируется электронный пучок, который с помощью мишени конвертируется в импульс ТИ.

Основные выходные характеристики ускорителя в режиме работы на согласованную нагрузку: напряжение на диоде ~ 2 МВ, ток диода $\sim 0,75$ МА, максимальная мощность электронного пучка $\sim 1,5$ ТВт, энергия электронного пучка 80 кДж, эффективность передачи энергии из двух ГИН в нагрузку ~ 50 %, длительность импульса ТИ на полувысоте ~ 45 нс. Энергию электронов и амплитуду тока можно варьировать в определенных пределах за счет изменения импеданса нагрузки. Разброс времени появления импульса ТИ относительно пускового импульса разрядников ДСФЛ не превышает ± 3 нс. Завершена экспериментальная отработка ВПЛ диаметром около 1 м с поворотом потока электромагнитной энергии на угол $\sim 80^\circ$. Все это позволяет перейти к созданию многомодульной установки ГАММА. В настоящее время ведется изготовление четвертого ускорительного модуля.

Заключение

В процессе создания и эксплуатации импульсных ускорителей электронов И-3000, СТРАУС, СТРАУС-2, ЛИУ-10М, СТРАУС-Р, ЛИУ-Р-Т и ГАММА-1 подтверждена высокая эффективность предложенных схем генераторов на СЛ. Накоплен значительный объем научно-технической информации и приобретен опыт по разработке и эксплуатации систем формирования высоковольтных импульсов, выполненных на основе СЛ с большим отношением максимального и минимального значений импедансов. Значительное повышение ускоряющего напряжения в результате волновых процессов позволяет снизить амплитуду зарядного напряжения, под действием которого ряд узлов и элементов ускорителя находится в течение сравнительно длительного процесса импульсной зарядки (для формирующих линий с водяной изоляцией ~ 1 мкс). Тем самым удается заметно повысить надежность работы установок.

Список литературы

1. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. New schemes for high-voltage pulsed generators based on stepped transmission lines // Proc. 9th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS 92). Washington, DC, 1992. Vol. 1. P. 511–516.
2. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Гордеев В. С. Безжелезные линейные индукционные ускорители электронов – мощные генераторы коротких импульсов тормозного излучения // Высокие плотности энергии. Сборник научных трудов. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1997. С. 107–133.
3. Gordeev V. S. Schemes of High-voltage pulse shapers on the basis of stepped transmission lines for high-current accelerators // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1999. № 4. С. 68–70.
4. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Савченко В. А. и др. Мощный электронный ускоритель ЛИУ-10 // Докл. АН СССР. 1980. Т. 250, № 5. С. 1118–1122.
5. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. et al. Pulsed power electron accelerators with the forming systems based on stepped transmission lines // Proc. 9th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS-92). Washington, DC, 1992. Vol. 1. P. 505–510.

6. Босамыкин В. С., Гордеев В. С., Мысков Г. А. и др. Линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-10М с индукторами на ступенчатых линиях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. № 4, 5 (31, 32). С. 117–119.
7. Gordeev V. S., Myskov G. A., Filippov V. O. et al. Investigation of STRAUS-2 pulsed electron accelerator characteristics // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1999. № 4. С. 71–73.
8. 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 // Там же. № 3. С. 82–84.
9. Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S. et al. Design of STRAUS-R accelerator // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2001. N 3. P. 56–59.
10. Gordeev V. S., Myskov G. A., Basmanov V. F. et al. Pulsed electron accelerator STRAUS-R // Proc. 15th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS 2004). Saint-Peterburg, RF, 2004. P. 323–326.
11. Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S. Design of linear induction electron accelerator LIA-R // Problems of Atomic Science and Technology (Ukraine). Series: Nuclear Physics Investigations. 2006. N 2(46). P. 40–42.
12. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С. Проект линейного индукционного ускорителя ЛИУ-Р // Труды межд. науч. конф. по проблемам физики высоких плотностей энергии «VIII Харитоновские научные чтения». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. С. 102–106.
13. Sincerny P., Ashby S., Childers K. et al. The DECADE high power generator // Proc. 9th IEEE Pulsed Power Conf. Albuquerque, USA, 1993. Vol. 2. P. 880–883.
14. Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S., Laptev D. V. Design of a high-current pulse electron accelerator // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1999. № 3. С. 68–70.
15. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С., Лаптев Д. В. Проект сильноточного ускорителя электронов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. Вып. 3. С. 176–183.

Review of High-Current Pulsed Electron Accelerators Developed on the Basis of Stepped Lines at RFNC-VNIIEF

V. F. Basmanov, V. S. Gordeev, A. V. Grishin, N. V. Zavyalov, G. A. Myskov,
S. T. Nazarenko

Here is presented a brief review of accelerators I-3000, STRAUS, STRAUS-2, LIA-10M, STRAUS-R, LIA-R-T and GAMMA-1. Forming systems of high-voltage accelerating pulses of these facilities have been constructed using multi-cascade stepped lines formed from uniform line segments with a step-like character of impedance change. Due to wave processes at high efficiency such systems provide output voltage rise by several times as compared to lines' charging voltage. Boundary electron energy of the accelerators lies in the range 2.3–25 MeV, peak beam current 20–750 kA, current pulse width at half-maximum 16–80 ns.