

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.384.64

### ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ НА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

© 2001 г. Л. Д. Бутаков, В. В. Васильев, И. И. Винтизенко, Э. Г. Фурман

НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 2а

Поступила в редакцию 14.12.2000 г.

Представлен новый класс линейных индукционных ускорителей на магнитных элементах, используемых в качестве источников электронных пучков для релятивистских с.в.ч.-генераторов. Такие ускорители разрабатываются в НИИ ядерной физики при ТПУ с 90-х годов на основе оригинальной компоновочной схемы с использованием низкоимпедансных полосковых формирующих линий, укладываемых поверх индукционной системы по спирали Архимеда. К настоящему времени разработаны ускорители с энергией электронов 0.4–2.4 МэВ при токах 2–6 кА и частотах следования импульсов в непрерывном режиме до 400 Гц, в пакетно-импульсном режиме до 3.3 кГц.

Линейные индукционные ускорители (л.и.у.) имеют определенные преимущества перед ускорителями других типов: относительно низкое напряжение на элементах конструкции, не превышающее напряжения возбуждения одного индуктора, темп ускорения до 1 МэВ/м, высокий к.п.д. преобразования электрической энергии в энергию электронного пучка, увеличение кинетической энергии электронов достигается применением однотипных ускоряющих модулей [1].

В первых вариантах ускорителей, изготовленных по компоновочной схеме [2], для коммутации формирующих линий использовались многоканальные искровые разрядники [3]. Недостатки, присущие таким коммутаторам, хорошо известны, прежде всего это невозможность работы разрядника в течение длительного времени с высокой частотой следования импульсов без применения специальных мер для удаления продуктов разряда.

Магнитный коммутатор, представляющий собой дроссель насыщения, способен практически с неограниченным ресурсом коммутировать ток в сотни килоампер с частотой в единицы килогерц. Чтобы габариты такого коммутатора и, соответственно, его индуктивность были минимальными, требуется осуществлять зарядку формирующих линий за время в сотни наносекунд от магнитных импульсных генераторов (м.и.г.) [4].

В работе [5] описан ускоритель на магнитных элементах ЛИУ 4/2. Он состоит из четырех модулей, два из которых являются ускоряющими и два (катодный и анодный) образуют инжекторный участок. В корпусах модулей размещены: ферромагнитная индукционная система, низкоимпедансные формирующие линии, коммутатор, система размагничивания сердечников.

Рядом с модулями расположены два магнитных импульсных генератора, подключенные к модулям высоковольтными радиочастотными кабелями. Схема питания ускорителя содержит пять емкостных накопителей и пять модуляторов на игнитронах ИРТ-6, определяющих количество импульсов в пакете. Частота следования импульсов в пакете доведена до 3.3 кГц при энергии электронов 2.4 МэВ и токе пучка 1 кА.

Разработка компактного источника питания релятивистских магнетронов привела к созданию компоновочной схемы ускорителя, в котором все элементы расположены в одном корпусе. Это позволяет уменьшить индуктивность соединения элементов, повысить надежность, снизить весогабаритные показатели.

Компоновочная и принципиальная электрическая схемы такого ускорителя (ЛИУ 04/4000) [6] приведены на рис. 1. В цилиндрическом корпусе Ø 700 мм, длиной 1600 мм размещены: индукционная система из пятнадцати сердечников, магнитный коммутатор  $L_1$ , представляющий собой одновитковый дроссель насыщения. Поверх сердечников расположены электроды полосковой одинарной формирующей линии (о.ф.л.)  $C_1$  и конденсатор  $C_2$  последнего звена сжатия м.и.г. (также выполнен в виде о.ф.л.). Высоковольтные электроды  $C_1$  и  $C_2$  являются общими и подключены к предпоследней ступени сжатия м.и.г. Два других электрода соединены между собой магнитным коммутатором  $L_1$ . По оси индукционной системы модуля установлен высоковольтный электрод с цилиндрическим изолятором.

Магнитный импульсный генератор имеет три ступени сжатия на дросселях насыщения  $L_3$ ,  $L_2$ , импульсном трансформаторе  $T_p$  и конденсаторах  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ . Для уменьшения индуктивности кон-

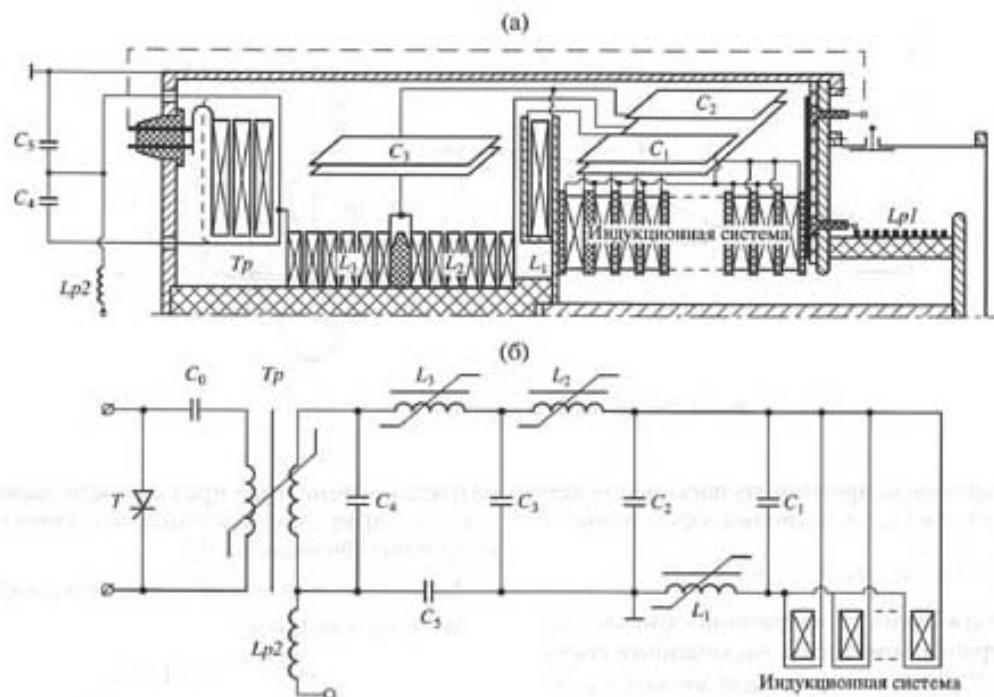


Рис. 1. Компоновочная (а) и принципиальная электрическая (б) схемы ЛИУ 04/4000.

денсатор  $C_3$  также выполнен в виде о.ф.л. Конденсаторы  $C_4$ ,  $C_5$  – высоковольтные (К75-74 0.1 мкФ, 40 кВ), установлены снаружи корпуса. Импульсный трансформатор  $T_p$  одновременно выполняет две функции: повышает напряжение, а при насыщении обеспечивает перезаряд конденсатора  $C_4$ . В качестве материала сердечников дросселей насыщения м.и.г. использована лента из пермаллоя 50 НП толщиной 0.02 мм, для сердечников коммутатора и индукционной системы – лента из пермаллоя 50 НП толщиной 0.01 мм.

Индукционная система размагничивается через однослойную катушку индуктивности  $L_{p1}$ , подключаемую к первичной обмотке импульсного трансформатора, и дополнительно током заряда конденсаторов первой ступени сжатия м.и.г., а сердечник импульсного трансформатора размагничивается от внешнего источника через индуктивность  $L_{p2}$ .

Принцип работы л.и.у. на магнитных элементах следующий. Первоначально устанавливается требуемый ток в цепи  $T_p$ , определяющий магнитное состояние сердечника, включается выпрямитель для заряда конденсатора  $C_0$ . С приходом управляющего импульса на тиристорный блок  $T$  (момент времени  $t_0$ ) конденсатор  $C_0$  подключается к первичной обмотке импульсного трансформатора. Начинается заряд  $C_5$ ,  $C_4$  и формирование тока размагничивания индукционной системы. Изменение напряжения на элементах схемы по-

казано на рис. 2. Конденсатор  $C_4$  заряжается непосредственно от вторичной обмотки  $T_p$ , а в цепи заряда  $C_5$  включены обмотки дросселей насыщения  $L_3$ ,  $L_2$ ,  $L_1$  и витки намагничивания индукционной системы, сердечники которых размагничиваются.

Интервал времени разряда  $C_0$  должен соответствовать длительности перемагничивания сердечника импульсного трансформатора

$$\pi \sqrt{L_0 C_0 / 2} = \Psi_{T_p} / \bar{U}_{C_0},$$

где  $L_0$  – индуктивность разрядного контура;  $\Psi_{T_p} = W_{T_p} S_{T_p} \Delta B$ ,  $W_{T_p}$ ,  $S_{T_p}$  – число витков первичной обмотки и сечение стали трансформатора,  $\Delta B$  – размах индукции в стали;  $\bar{U}_{C_0} = U_{C_0} / 2$  – среднее действующее напряжение на витках трансформатора,  $U_{C_0}$  – амплитуда зарядного напряжения конденсатора  $C_0$ .

В момент времени  $t_1$  ток конденсатора  $C_0$  переходит нулевое значение и тиристорный блок  $T$  выключается. Под действием напряжения конденсатора  $C_4$  насыщается  $T_p$ , и конденсатор  $C_4$  перезаряжается через индуктивность вторичной обмотки трансформатора. При этом сумма напряжений конденсаторов  $C_5$ ,  $C_4$  прикладывается к обмотке дросселя насыщения  $L_3$ . Величина потокосцепления  $L_3$  выбирается такой, чтобы к моменту времени  $t_3$ , когда конденсатор  $C_4$  полно-

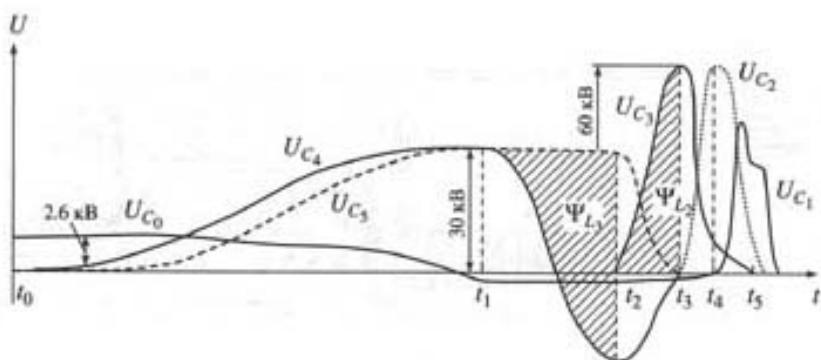


Рис. 2. Эпюры напряжений на элементах л.и.у.

стью перезарядился, произошло насыщение сердечника дросселя  $L_3$ , т.е. выполнилось условие

$$\pi\sqrt{L_{T_p}C_4} = \Psi_{L_3}/(U_{C_4} + U_{C_3})/2,$$

где  $L_{T_p}$  – индуктивность вторичной обмотки импульсного трансформатора в насыщенном состоянии;  $\Psi_{L_3} = W_3 S_3 \Delta B$ ,  $W_3$ ,  $S_3$  – число витков и сечение магнитопровода дросселя насыщения  $L_3$ ,  $\Delta B$  – размах индукции;  $(U_{C_4} + U_{C_3})/2$  – среднее действующее напряжение на дросселе  $L_3$ ,  $U_{C_4}$ ,  $U_{C_3}$  – амплитуды зарядного напряжения конденсаторов  $C_4$ ,  $C_3$ .

Последовательно включенные относительно  $C_3$  конденсаторы  $C_5$ ,  $C_4$  начнут разряжаться на  $C_3$ . В интервале времени  $t_2-t_3$  перемагничивается сердечник дросселя  $L_2$  и при его насыщении (время  $t_3$ )  $C_3$  начнет разряжаться на конденсатор  $C_2$ . В интервале  $t_3-t_4$  перемагничивается сердечник магнитного коммутатора  $L_1$ , и  $C_2$  разряжается на формирующую линию  $C_1$ . Линия, разряжаясь через витки намагничивания индукционной системы, формирует импульс высокого напряжения. При работе на омическую нагрузку импульсы напряжения и тока имеют колоколообразную форму. В этом случае о.ф.л.  $C_1$  выполняет роль соглашающей линии. При работе на электронный диод за счет задержки появления тока при взрывной электронной эмиссии о.ф.л.  $C_1$  заряжается в режиме, близком к холостому ходу, формируя импульсы напряжения и тока с плоской вершиной.

Как следует из принципа работы ускорителя, интервалы времени передачи энергии от одного звена сжатия к другому определяются значениями потокосцеплений импульсного трансформатора и дросселей насыщения. Выбирая число витков и сечение магнитопровода этих элементов, можно осуществить компрессию энергии первичного накопителя с высоким к.п.д. и произвести зарядку о.ф.л. за время ~300 нс. Для снижения весогабаритных показателей л.и.у. на магнитных элементах использован эффект перекрытия фаз

разряда конденсатора предыдущего звена сжатия м.и.г. и заряда конденсатора следующего звена, подробно описанный в [6].

Если величина потокосцепления дросселя  $\Psi'_{L_3}$  меньше необходимой

$$\Psi_{L_3} = (1.1+1.3)\Psi'_{L_3},$$

то к.п.д. передачи энергии снижается:

$$k = [1 - \cos(\pi/1.1+1.3)]/2 = 0.98+0.87.$$

Однако при этом заметно сокращается сечение сердечника дросселя насыщения, а значит вес и потери на перемагничивание. Одновременно уменьшается индуктивность витка дросселя следующего звена сжатия и время перезаряда конденсаторов.

Оптимизация к.п.д. передачи энергии от основного накопителя в о.ф.л. осуществляется по компьютерной программе. Компьютерная модель л.и.у. создана для расчета протекающих в ускорителе процессов, оценки омических потерь и потерь на перемагничивание сердечников, возможности оперативного подбора параметров элементов ускорителя для настройки на экстремумы, например, по выходной мощности, к.п.д., качеству пучка и т.д.

Для решения поставленных задач реальная электрическая схема представлялась эквивалентной схемой, определялись параметры элементов, записывались нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных для напряжений и токов. Сравнение с экспериментальными данными измерений напряжения на конденсаторах м.и.г. и параметров выходных импульсов показало совпадение в пределах 10%. Проведенные расчеты позволили уменьшить массу сердечников дросселей насыщения на 160 кг при к.п.д. передачи энергии первичного накопителя в электронный пучок =50%.

Принципиальная электрическая схема системы питания ЛИУ 04/4000 приведена на рис. 3, она

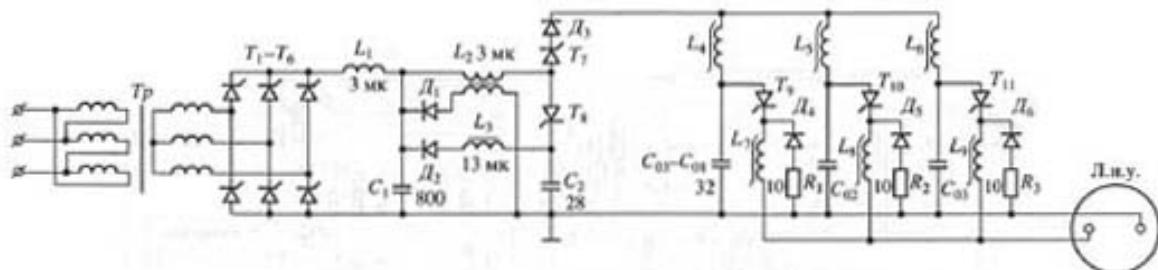


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема питания л.и.у.  $T_1-T_{11}$  – ТБ 453-1000-22;  $D_1, D_2$  – Д143-400-30,  $D_3-D_6$  – ДЧЛ 133-200-12.

разделяется на две функциональные части – ввод энергии в л.и.у. и зарядка емкостного накопителя.

Энергия в ускоритель поступает при разрядке первичных емкостных накопителей  $C_{01}, C_{02}, C_{03}$ , состоящих из малоиндуктивных высокочастотных конденсаторов К75-60 1 мкФ, 5 кВ, через насыщающийся дроссель при включении трех параллельных каналов из трех последовательно включенных тиристоров  $T_9-T_{11}$  ТБ 453-1000-22.

Принцип работы схемы следующий. Предварительно размагниченный дроссель  $L_1(L_8, L_9)$  задерживает разрядный ток на 3–4 мкс. Амплитуда тока в выходной шине равна 13,4 кА при зарядном напряжении накопителя 2,6 кВ. Длительность разрядки 30 мкс. После срабатывания ускорителя часть энергии возвращается назад и через 20–30 мкс наводит на входных клеммах л.и.у. э.д.с. противоположной полярности. Это обусловлено использованием эффекта перекрытия фаз в звеньях сжатия м.и.г., а также исполнением согласования формирующей линии и нагрузки.

Для повышения к.п.д. длительность управляющих импульсов на тиристорах  $T_9-T_{11}$  увеличена, чтобы последние оставались проводящими к моменту возврата энергии. Основная ее часть возвращается в  $C_{01}-C_{03}$ , создавая второй импульс тока. Оставшаяся после выключения тиристоров энергия рассеивается на резисторах  $R_1-R_3$  и диодах  $D_4-D_6$ .

Зарядка емкостных накопителей  $C_{01}, C_{02}, C_{03}$  до 2,6 кВ с частотой циклов  $F \leq 320$  Гц производится от трёхфазного выпрямителя мощностью 90 кВт. Схема устройства использует принцип колебательной зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения. Управляемый выпрямитель  $T_1-T_6$  в рабочем состоянии полностью открыт. Выпрямленное напряжение составляет  $U = 1,5$  кВ. Основная функция управления – отключать управляющие импульсы с тиристоров при коротком замыкании или перегрузке. Фазовое управление используется для плавной зарядки конденсатора фильтра  $C_1$ , а также для ручного регулирования выпрямленного напряжения.

Конденсаторы  $C_{01}, C_{02}, C_{03}$  заряжаются через дроссель  $L_2$  при включении тиристора  $T_7$ . Длительность синусоидальной полуволны тока = 1,5 мс. Амплитуда тока зарядки 300–500 А в зависимости от наличия обратного напряжения на  $C_{01}-C_{03}$ . Зарядное напряжение регулируется прерыванием процесса зарядки. Глубина регулирования ~50% от максимума.

Тиристор  $T_8$  включается, когда зарядное напряжение первичных накопителей достигает заданного уровня. Ток через  $L_2$  переключается в  $C_2$ , и  $T_7$  выключается. Быстро восстанавливающийся диод  $D_3$  уменьшает амплитуду обратного напряжения на  $T_8$ .

Нарастание напряжения на  $C_2$  ограничено цепью  $D_1$  – вторичная обмотка  $L_2$  на уровне  $2U = 3$  кВ, так как коэффициент трансформации обмоток равен единице. Энергия, оставшаяся в  $L_2$ , возвращается по этой цепи в конденсатор фильтра  $C_1$ . Тиристор  $T_8$  обесточивается и выключается. Энергия, запасенная в  $C_2$ , колебательно через  $L_3$  и  $D_2$  также возвращается в  $C_1$ . Включение  $T_7$  задержано на 1 мс от начала разрядки, когда разрядная цепь уже полностью обесточена, а тиристоры  $T_9-T_{11}$  восстановили "запирающую" способность.

Тиристоры  $T_9-T_{11}$  с большой площадью структуры имеют ток утечки до 10 мА. Этот ток, а также ток через выравнивающие резисторы разряжает накопительные конденсаторы, создавая погрешность, резко возрастающую с уменьшением частоты циклов. Для компенсации утечки заряда используется дополнительный источник напряжения мощностью 150 Вт с максимальным напряжением 3 кВ. Источник выполнен по схеме однотактного обратноходового преобразователя напряжения и включен в общую цепь стабилизации. Он начинает работать только после того, как зарядное устройство зарядит накопитель до заданного напряжения.

Опыт эксплуатации ЛИУ 04/4000 показал необходимость ограничения напряжения накопителей  $C_{01}-C_{03}$  для повышения надежности тиристорного узла. Было решено снизить зарядное напряжение до 1000 В, т.е. до уровня рабочих

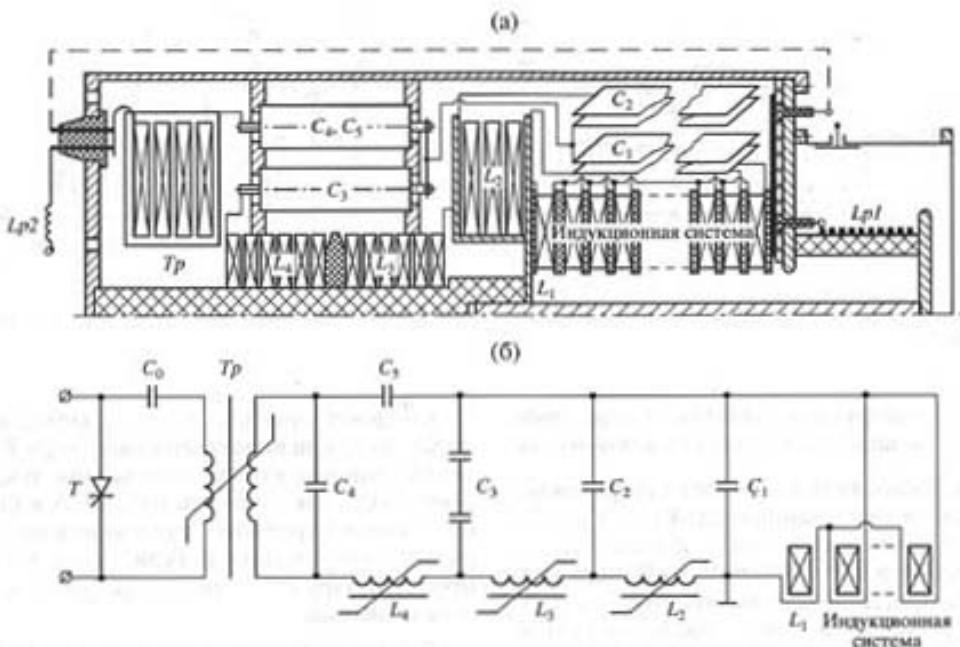


Рис. 4. Компоновочная (а) и принципиальная электрическая (б) схемы ЛИУ 04/6.

напряжений одного тиристора. В этом случае исключается сетевой трансформатор, и напряжение трехфазной сети поступает прямо на вход выпрямителя.

Запасаемая энергия в первичном накопителе увеличена за счет использования емкости 1000 мкФ (конденсаторы K75-81 20 мкФ, 1.6 кВ). Это вызывает удлинение во времени разрядного процесса и облегчение условий работы тиристоров по скорости нарастания тока. Амплитуда коммутируемого одним тиристором тока снижается разбиением разрядного контура на шесть каналов.

С целью заряда конденсаторов м.и.г. до их рабочего напряжения коэффициент трансформации импульсного трансформатора выбран равным 30. Для сохранения коэффициента сжатия одного звена в пределах 3–4 и поддержания высокого к.п.д. передачи энергии использовано дополнительное звено сжатия в м.и.г.

Компоновочная и принципиальная электрическая схемы такого ускорителя (ЛИУ 04/6) показаны на рис. 4. Увеличение интервалов времени перезарядных процессов в первых звеньях сжатия м.и.г. позволило использовать промышленные малоиндуктивные высокочастотные конденсаторы K75-74 0.1 мкФ, 40 кВ, устанавливаемые параллельно по шесть штук для  $C_4$  и  $C_5$  и последовательно-параллельно 12 штук для  $C_3$ . Поскольку плотность запасаемой в них энергии значительно выше, в едином корпусе удалось разместить все элементы м.и.г. и ускорителя. Как и в предыду-

щей версии (ЛИУ 04/4000), конденсатор  $C_2$  выполнен в виде о.ф.л.

Принцип действия ускорителя и схемы его питания остались прежними. Однако по результатам аналитических оценок и численных расчетов по компьютерной модели емкость конденсатора последнего звена сжатия превышает емкость формирующей линии ( $C_2 = 1.5C_1$ ). В этом случае формирующая линия заряжается до напряжения на 20% выше максимального зарядного напряжения  $C_2$  (перекрытие фаз не используется). Поскольку емкость о.ф.л. стала меньше, разрядный ток на нагрузке увеличивается.

Расчет по компьютерной модели с учетом паразитных индуктивностей и емкостей, потерь в сердечниках и т.д. показывает увеличение мощности на 25%. Для ЛИУ 04/6 выбрано  $\lambda = C_2/C_1 = 1.5$ , поскольку уменьшение  $C_1$  до 0.15 мкФ вызывает увеличение зарядного напряжения  $U_{C_1}$  и необходимость использования дополнительной изоляции. Кроме того, возрастают потери энергии, связанные с остаточным напряжением на  $C_2$ .

В общем случае коэффициент передачи энергии  $\beta$  [4], который определяется как отношение энергии, запасенной в  $C_2$  к моменту насыщения магнитного коммутатора, к энергии, запасенной в формирующей линии, зависит от потерь в обмотке  $L_1$ , в сердечнике  $L_1$ , потерь в емкостях  $C_2$  и  $C_1$ , а также от отношения емкостей. В предположении отсутствия потерь в обмотке и конденсато-

Модель	Параметр				
	Энергия электронов, кэВ	Ток, кА	Длительность импульса, нс	Частота следования, Гц	Применение
ЛИУ 4/2	2000	1	50	3300	Исследование воздействия р.э.п. на различные среды
ЛИУ 04/4000	400	4	180	320	Релятивистский магнетрон [7]
ЛИУ 04/6	400	6	120	400	Релятивистский магнетрон, триод

рах коэффициент передачи можно записать как  $\beta = 4\lambda/(1+\lambda)^2 = 0.96$ .

Таким образом, увеличение импульсной мощности л.и.у. на 25% при незначительных потерях энергии (4%) определило необходимость использования о.ф.л. емкостью в 1.5 раза меньшей, чем у конденсатора последнего звена сжатия.

Система управления ускорителями ЛИУ 04/4000 и ЛИУ 04/6 позволяет регулировать напряжение первичного накопителя, задавать частоту следования импульсов, непрерывный или пакетный режим работы, число импульсов в пакете, автоматический или ручной пуск, интервал между пакетами, а также система управления снабжена блокировками, исключающими неправильную эксплуатацию.

В таблице приведены параметры линейных индукционных ускорителей на магнитных элементах, созданных в НИИ ядерной физики при ТПУ. Схема питания ускорителя со стабилизацией напряжения первичного накопителя позволяет формировать импульсы выходного напряжения л.и.у. с высокой воспроизводимостью амплитуды и формы (нестабильность <5%). Важным достоинством разработанных л.и.у. является возможность инвертирования полярности выходного напряжения, которая осуществляется перестановкой

шин на выводах импульсного трансформатора и переключения полярности источников размагничивания.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории В.И. Гусельникову, А.И. Мащенко, В.Ю. Митюшкой за помощь в проектировании и исследовании отдельных узлов ускорителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. М.: Атомиздат, 1978. С. 245.
2. Васильев В.В., Канаев Г.Г., Фурман Э.Г. // ПТЭ. 1985. № 5. С. 19.
3. Фурман Э.Г., Васильев В.В. // ПТЭ. 1988. № 1. С. 111.
4. Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев И.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. М.: Сов. радио, 1968. С. 476.
5. Фурман Э.Г., Васильев В.В., Томских О.Н. и др. // ПТЭ. 1993. № 6. С. 45.
6. Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И. и др. // ПТЭ. 2000. № 3. С. 119.
7. Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 13. С. 65.