

УДК 621.384.64

И. И. ВИНТИЗЕНКО, Э. Г. ФУРМАН

## ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

В обзоре приведены результаты научно-исследовательских работ по созданию линейных индукционных ускорителей – частотно-периодических ускорителей мощных релятивистских пучков. В первой части рассмотрен принцип работы, компоновочная схема ускорителя, приведены соотношения для оценки основных электрических и геометрических параметров. Во второй части описана конструкция, принцип работы ЛИУ с использованием многоканальных искровых разрядников для коммутации низкоимпедансных формирующих линий. Третья часть статьи посвящена описанию линейных индукционных ускорителей на основе магнитных элементов – дросселей насыщения. Результаты исследований сведены в таблицу, содержащую информацию о параметрах ускорителей, в разные годы спроектированных и запущенных в НИИЯФ по заказу различных организаций.

В статье рассмотрены элементы теории и техники линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) генераторов мощных релятивистских электронных пучков (РЭП).

Подобный класс ускорителей [1, 2] разрабатывается в НИИ ядерной физики с 80-х гг. на основе оригинальной элементной базы: низкоимпедансных полосковых формирующих линий [3], многоканальных искровых разрядников с принудительным делением тока между каналами [4], нелинейных дросселей насыщения [5], катодных узлов на основе диэлектрического эмиттера [6].

Линейные индукционные ускорители могут формировать электронные пучки значительной энергии, в которых токи достигают единиц и десятков килоампер. ЛИУ имеют определенные преимущества перед ускорителями других типов: относительно низкое напряжение на элементах конструкции, не превышающее напряжение возбуждения одного индуктора, темп ускорения до 1 МэВ/м, высокий КПД преобразования электрической энергии в энергию

РЭП, нет теоретического предела по величине кинетической энергии электронов.

Принцип действия ЛИУ заключается в том, что в системе ряда последовательно установленных тороидальных ферромагнитных сердечников возбуждается изменяющийся во времени магнитный поток, который создает вихревое электрическое поле, ускоряющее электроны. Напряженность электрического поля на оси индукционной системы определяется как

$$E(t) = -NU(t)/L, \quad (1)$$

где  $N$  – число ферромагнитных сердечников;  $U(t)$  – напряжение возбуждения сердечника;  $L$  – длина индукционной системы.

При возбуждении сердечников импульсами прямоугольной формы  $U(t) = U_0$  приращение кинетической энергии пучка с током  $I_n$

$$\Delta E = \int_0^t I_n(t)U(t)Ndt = I_n S \Delta BN, \quad (2)$$

где  $S$  – сечение ферромагнитного сердечника;  $\Delta B$  – приращение в нем индукции за время действия импульса напряжения  $t$ .

Поскольку величина  $\Delta B$  у стали 50 НП не превышает 3 Тл, увеличение  $S$  ограничено ростом потерь на перемагничивание сердечника, поэтому повышение энергии РЭП может осуществляться за счет ускоряемого тока или кинетической энергии электронов выбором  $N$ .

### 1. Компоновочная схема

На рис.1 приведена конструкция ускоряющего модуля ЛИУ, в котором объединены в едином корпусе ферромагнитная индукционная система, низко-

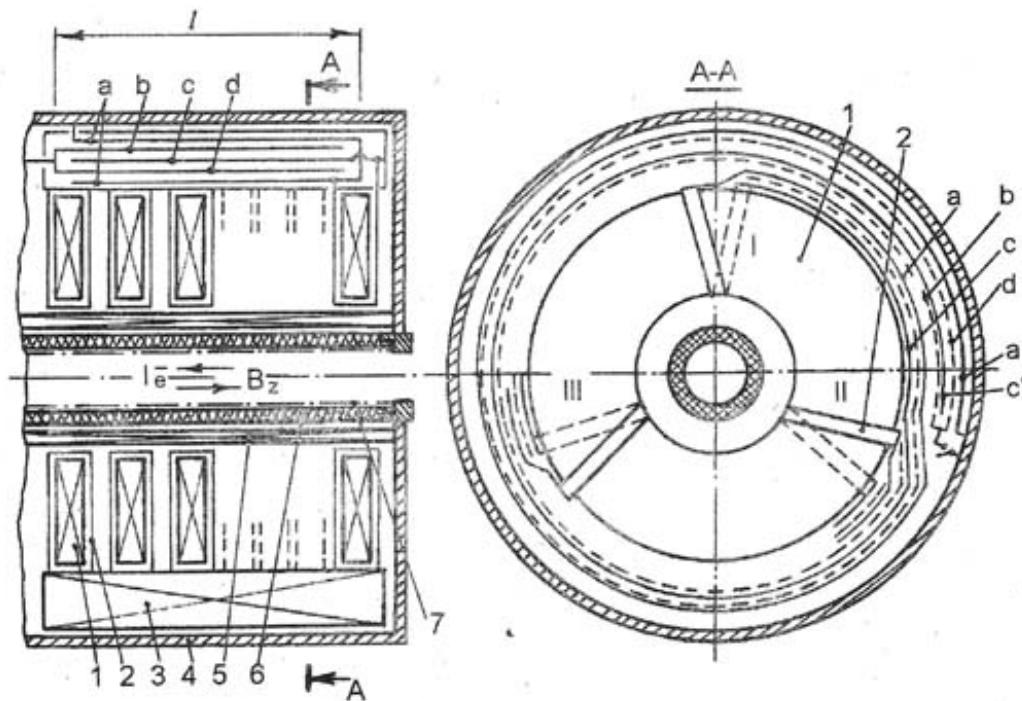


Рис.1. Конструкция ускоряющего модуля линейного индукционного ускорителя

импедансные формирующие линии, коммутатор, система размагничивания сердечников и создания фокусирующего магнитного поля для транспортиров-

ки пучка. Инжекторный модуль отличается от ускоряющего наличием осесимметричного высоковольтного электрода.

Ферромагнитные сердечники 1, охваченные витками намагничивания 2, подключены к выводам формирующей линии 3, выполненной в виде полосковой двойной (ДФЛ) или одинарной (ОФЛ) формирующей линии. ДФЛ состоит из четырех обкладок *a,b,c,d*, уложенных по спирали Архимеда вокруг сердечников. На рис.1 показана система трех параллельно включенных ДФЛ. Потенциальные обкладки *b,d* каждой линии подключены к анодам 1 (рис.2) многоканального разрядника. Обкладки *a,c* подключены к виткам намагничивания сердечников, причем электрод *a* другим концом заzemлен на корпус ускорителя 7, то есть подключен к катоду 2 (рис.2) разрядника.

Ускоряющий тракт выполнен из сплошной диэлектрической трубы 6 со слабопроводящим покрытием 7, которое служит для стекания заряда электронов, попадающих на внутреннюю поверхность, и выравнивания потенциала по длине тракта. Поверх трубы уложен соленоид 5, один вывод которого подключен к корпусу ЛИУ, другой – к источнику тока. Ток соленоида осуществляет размагничивание сердечников и создает продольное фокусирующее поле  $B_z$ .

Длительность импульса  $\tau$ , запасаемая энергия  $Q$ , волновое сопротивление  $Z$  полосковой ДФЛ, ток пучка  $I_p$  для  $N$  сердечников при максимальном напряжении  $U_0$  заряда ДФЛ связаны с размерами линии и толщиной изоляции  $d$  между электродами следующими зависимостями:

$$\tau = 2\ell \sqrt{\epsilon} / c, \quad (3)$$

$$Q = 2\epsilon \epsilon_0 U_0^2 m h l / d, \quad (4)$$

$$I_p = k Q / U_0 N \tau, \quad (5)$$

$$Z = 400 N^2 d / k m h \sqrt{\epsilon}, \quad (6)$$

где  $c$  – скорость света;  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon$  – абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости вакуума и изоляции;  $m$  – число параллельно соединенных линий;  $k$  – КПД преобразования энергии ДФЛ в кинетическую энергию электронов;  $h$ ,  $\ell$  – ширина и длина электродов.

КПД в основном определяется соотношением тока намагничивания  $I_m$  сердечников и тока пучка:

$$K = I_m / (I_m + I_p). \quad (7)$$

Линейный размер секции определяется количеством сердечников  $N$ , при этом сечение стали одного сердечника должно быть не менее

$$S \geq U_0 \tau / \Delta B. \quad (8)$$

Внешний диаметр намотки ДФЛ определяется как

$$D_m = [D_c^2 + 16(\delta + d)m\ell / \pi]^{1/2}, \quad (9)$$

где  $D_c$  – наружный диаметр индукционной системы;  $\delta$  – толщина электродов.

Приведенные соотношения (2)–(9) позволяют провести оценку выходных параметров ( $U, I, t$ ) и геометрических размеров ЛИУ.

Основной недостаток полосковых ДФЛ (ОФЛ) – повышение напряженности электрического поля на краях электродов. Снизить влияние краевого эффекта можно нанеся по контуру всех электродов слабопроводящий слой с объемным сопротивлением в  $10^4$ – $10^5$  раз меньшим, чем у изоляции линии [3]. Напряженность электрического поля при этом определяется не конфигурацией края обкладки, а падением напряжения вдоль слоя. Экспериментально был подобран материал, имеющий объемное сопротивление  $\sim 10^6$  Ом·м при  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 4,5$ , обладающий хорошей адгезией к металлам, а также рассчитаны размеры слабопроводящего слоя, разработана методика его нанесения.

Для коммутации энергии полосковых формирующих линий, число которых составляет от 2 до 12, требуется коммутатор, обладающий индуктивностью не более  $10^{-9}$  Гн, на ток 60–420 кА длительностью  $10^{-7}$  с. Для частотного режима это можно осуществить двумя способами: применением многоканальной искровой коммутации или магнитной коммутации на основе дросселей насыщения.

## 2. Многоканальный разрядник

Разработанные в НИИЯФ малоиндуктивные кольцевые многоканальные разрядники [4] имеют в реальных условиях верхний предел по частоте срабатывания порядка 100 Гц, определяемый временем восстановления электрической прочности промежутка.

На рис.2 показана функциональная схема многоканального разрядника в развернутом виде. Конструктивно он располагается на торце модуля. К электроду 1 и катоду 2 подключены обкладки полосковой ДФЛ, а искровые промежутки, образованные анодами 4, пусковыми электродами 3 с общим катодом 2, помещены в тороидальную диэлектрическую камеру. Электроды 3 длиной  $h$  введены в глубь искрового промежутка на величину  $\Delta$ . Аноды 4 охвачены ферритовыми кольцами 5.

Кратко рассмотрим принцип работы разрядника, более подробная информация содержится в [4]. В момент времени, когда зарядный ток ДФЛ переходит нулевое значение, трехобмоточный дроссель насыщения (ДрН), включенный последовательно со вторичной обмоткой импульсного трансформатора  $I_{tr}$ , перемагничивается, так как закрывается диод  $D_2$ , и формируется высоковольтный импульс напряжения для запуска стартового разрядника Р. При включении Р происходит инвертирование напряжения на резисторах  $R$ , следовательно, и на пусковых электродах 3. Первоначально начинается развитие разряда в искровых промежутках анод 4 – пусковой электрод 3. При дальнейшем изменении напряжения на пусковом электроде, когда напряжение станет больше пробивного  $U_{pk}$ : пусковой электрод 3 – катод 2, происходит пробой последнего. Поскольку время формирования пробоя пропорционально длине искрового промежутка, то, обеспечивая соответствующую скорость инвертирования напряжения на пусковых электродах, можно организовать равномерное включение каналов. Однако пробой даже одинаковых искровых промежутков носит статистический характер. При опережающем включении одного из каналов ухудшаются условия запуска ближайших каналов, так как между общими электродами 1, 2 разрядника распространяется волна нуля напряжения. Для исключения шунтирования межэлектродных емкостей многоканального разрядника, выравнивания токов в отдельных каналах, уменьшения разброса времени включения применено принудительное деление тока в каналах. Для этих целей используется анодный делитель с общим короткозамкнутым витком 6. Для уменьшения индуктивности виток 6 выполнен в виде двух

встречнопараллельных витков. При опережающем включении ряда искровых промежутков ток в них ограничивается на уровне тока перемагничивания ферритового сердечника 5. При этом на участках короткозамкнутых витков, охватывающих включившиеся каналы, индуцируется ЭДС, приложенная к участкам витков, охватывающих невключившиеся каналы. Это приводит к дополнительному заряду межэлектродных емкостей невключившихся каналов и их срабатыванию.

Разработанная программа компьютерного моделирования работы опи-

#### Линейные индукционные ускорители, разработанные в НИИЯФ

Мо- дель	Кол. секций	$U$ , кВ	$I$ , кА	$\tau$ , нс	Тип линий	$f$ , Гц	Организация	Применение	Особенности
<u>ЛИУ на разрядниках</u>									
ЛИУ 2/3	4	2000	3	70	ДФЛ	10	НИИЯФ, 1981	Лазер на свобод- ных электронах	
ЛИУ 2/10	4	2000	5	120	ДФЛ	1	ХФТИ г.Харьков, 1982	Ускорение тяже- лых ионов кол- лективным ме- тодом	Для исследований в области термоядерного синтеза
ЛИУ 05/5	1	500	4,5	80	ДФЛ	160	НПО "Астрофизика" г.Москва, 1986	Возбуждение газовых лазеров	Релятивистский магне- тран Р <sub>СВЧ</sub> ~360МВт
ЛИУ 04/7	1	400	7	70	ДФЛ	20	КБ "Проект", НИИЯФ, 1989	Релятивистский магнетрон Р <sub>СВЧ</sub> ~250МВт	Мобильный вариант
ЛИУ 04/7	1	400	7	80	ДФЛ	10	НИИЯФ, 1992- 1997	Релятивистский магнетрон	Сложение мощности с двух выводов, сложение мощности двух магне- тров при синхронизо- ванной работе двух секций
ЛИУ 07/6	1	700	6	80	ДФЛ	50	НПО "Горизонт" г.Москва, 1986	Генерация СВЧ- излучения	
ЛИУ 03/18	2	300	18	200	ДФЛ	5	НИИЯФ, 1989	Отражательный триод Р <sub>СВЧ</sub> ~70МВт	Параллельная работа двух секций
ЛИУ 04/12	1	350	12	200	ДФЛ	10	НИИЯФ, 1997	Отражательный триод Р <sub>СВЧ</sub> ~200МВт	Частота 1 Гц ограниче- на нагревом и деформа- цией сетки триода
ЛИУ 05/4	1	280	15	260	ОФЛ	10	МРТИ г.Москва, 1989	Р <sub>СВЧ</sub> ~70МВт Вывод электронного пучка в атмосферу	Совмещенная схема питания ускорителя и магнитного поля
<u>ЛИУ на магнитных элементах</u>									
ЛИУ 2/2	4	2000	2	50	ОФЛ	3300	МРТИ г.Москва, 1991	Исследование воздействия РЭП на различ- ные среды	Диэлектрический эмит- тер для формирования РЭП
ЛИУ 03/3	1	450	4,5	200	ОФЛ	до*	НИИЯФ, 1997	Релятивистский магнетрон Р <sub>СВЧ</sub> ~300МВт*	Постоянное магнитное поле

\* Проектные параметры

санного разрядника позволяет определить профили электродов, величины  $h$  и  $\Delta$ , номиналы элементов пусковой цепи  $R$ ,  $C$ , конструкцию ДрН. Опыт эксплуатации разработанных ускорителей (таблица) показал высокую надежность и большую долговечность ( $>10^6$  срабатываний) многоканальных разрядников (число каналов 12–24).

Для заряда формирующих линий ЛИУ с искровыми разрядниками разработаны простые и надежные схемы питания, которые одновременно могут формировать и ток в магнитной системе СВЧ-прибора [7]. В схемах питания используются емкостные накопители на основе конденсаторов К41-И7, первичный коммутатор-игнитрон или блок из быстродействующих тиристоров, импульсный трансформатор, установленный в отдельном корпусе или размещененный внутри секции, а также цепь заряда накопителя (зарядный дроссель, сетевой трансформатор, выпрямитель). В наиболее совершенной модели ЛИУ с импульсной мощностью электронного пучка 4 ГВт габариты установки следующие: диаметр 700 мм, длина 900 мм, масса 700 кг.

### 3. ЛИУ на магнитных элементах

Коммутатором, способным практически с неограниченным ресурсом коммутировать в наносекундном диапазоне длительностей с частотой в единицы килогерц ток в сотни килоампер, является магнитный коммутатор, представляющий собой дроссель насыщения. Однако для реализации такого коммутатора с минимальными габаритами и соответственно минимальной индуктивностью требуется осуществлять зарядку формирующих линий за время в сотни наносекунд от магнитных генераторов импульсов.

Функциональная схема модуля ускорителя [5] показана на рис.3. Весь ус-

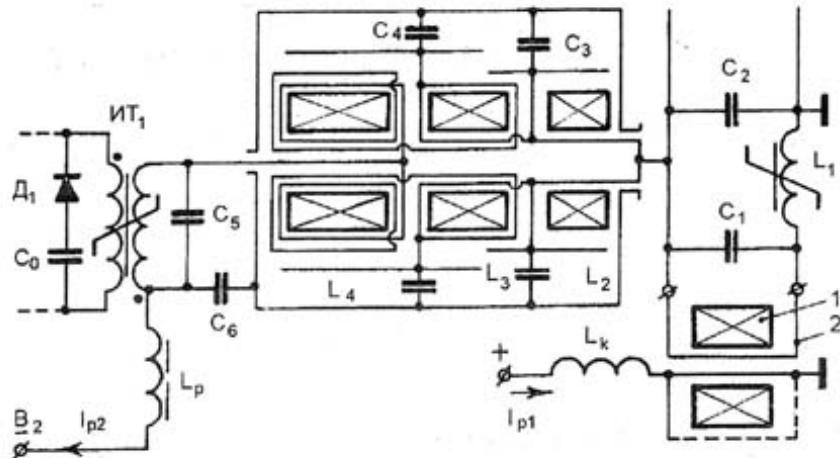


Рис.3. Функциональная схема ЛИУ на магнитных элементах

коритель состоит из четырех модулей, два из которых являются ускоряющими и два (катодный и анодный) образуют инжекторный участок. Рядом с модулями расположены два магнитных импульсных генератора (МИГ). Высоковольтная часть каждого модуля расположена в цилиндрическом баке диаметром 700 мм, длиной 900 мм и содержит индукционную систему 1 из двадцати одного сердечника, магнитный коммутатор  $L_1$ , представляющий одновитковый дроссель насыщения. Поверх сердечников расположены электроды полосковых ОФЛ, обладающих емкостью  $C_1$  и  $C_2$ . Высоковольтный электрод является общим и подключен к предпоследней ступени сжатия МИГ. Два других электрода соединены между собой дросселем насыщения  $L_1$ . По оси индукционной системы катодного модуля пропущен катододержатель, анодного модуля – металлическая труба тракта транспортировки пучка, поверх которой уложен фокусирующий соленоид. В ускоряющих модулях пучок ускоряется в диэлектрических вакуумных трактах, поверх которых намотаны фокусирующие соленоиды.

Система зарядки формирующих линий модулей – двухканальная. В первом канале катодный и анодный модули, а во втором оба ускоряющих модуля с помощью набора коаксиальных кабелей подключены к соответствующим им МИГам. Магнитный импульсный генератор имеет три ступени сжатия на дросселях насыщения  $L_2, L_3, L_4$ . Обкладки конденсаторов  $C_3, C_4$  уложены вокруг дросселей  $L_2, L_3$ .

Конденсаторы  $C_5-C_6$  – высоковольтные типа ИК 100–0,25 установлены снаружи бака. Импульсный трансформатор ИТ<sub>1</sub> одновременно выполняет две функции: повышает напряжение, а при насыщении является индуктивностью для перезаряда конденсатора  $C_5$ . Вокруг трансформатора расположены катушки развязывающей индуктивности  $L_p$  цепи размагничивания сердечника трансформатора.

Индукционная система размагничивается по цепи индуктивности  $L_k$ , подключенной к первичной обмотке импульсного трансформатора.

Принцип работы ЛИУ на магнитных элементах следующий. Первоначально устанавливается требуемый ток  $I_{p2}$  в цепи  $L_p$  определяющий магнитное состояние ИТ<sub>1</sub>, включаются выпрямители для заряда конденсатора  $C_0$ . С приходом управляющего импульса на тиристорный блок (игнитрон)  $D_1$  конденсатор  $C_0$  подключается к первичной обмотке импульсного трансформатора. Начинается заряд  $C_5, C_6$  и формирование тока  $I_{p1}$  в цепи  $L_k$ . Изменение напряжений на некоторых элементах схемы показано на рис.4. Конденсатор  $C_5$  заряжается непосредственно от вторичной обмотки ИТ<sub>1</sub>, а в цепи заряда  $C_6$  оказываются включенными обмотки дросселей насыщения  $L_4, L_3, L_2, L_1$  и витки намагничивания индукционной системы 2, которые размагничиваются. В момент времени  $t_2$  ток конденсатора  $C_0$  переходит нулевое значение и тиристорный блок  $D_1$  выключается. Под действием ЭДС конденсатора  $C_5$  ИТ<sub>1</sub> насыщается и конденсатор  $C_5$  перезаряжается через индуктивность вторичной обмотки трансформатора. При этом разность напряжений конденсаторов  $C_5, C_6$  прикладывается к дросселям насыщения  $L_4, L_3, L_2, L_1$ . К моменту времени  $t_3$  сердечник дросселя  $L_4$  насыщается,  $C_5$  должен перезарядиться, и последовательно включенные относительно  $C_4$  конденсаторы  $C_5, C_6$  разряжаются на  $C_4$ .

В интервале времени  $t_3-t_4$  перемагничивается сердечник дросселя  $L_3$  и  $C_4$  разряжается на емкость  $C_3$ . В течение  $t_4-t_5$  перемагничивается сердечник дросселя  $L_2$  и  $C_3$  разряжается на емкость формирующей линии  $C_2$ . После насыщения дросселя  $L_1$  (момент времени  $t_6$ ) ОФЛ с емкостью  $C_2$  начинает заряжать ФЛ с емкостью  $C_1$ , формируя импульс высокого напряжения.

Как следует из принципа работы ускорителя, интервалы времени передачи энергии от одной ступени сжатия к другой определяются потокосцеплением дросселей насыщения, импульсного трансформатора и могут регулироваться относительно момента включения тиристорного блока  $D_1$  с высокой точностью выбором начального магнитного состояния сердечника импульсного трансформатора, задаваемого током размагничивания в цепи  $L_p$ . Это позволяет синхронизировать работу любого числа однотипных модулей.

Время перезаряда  $C_5$

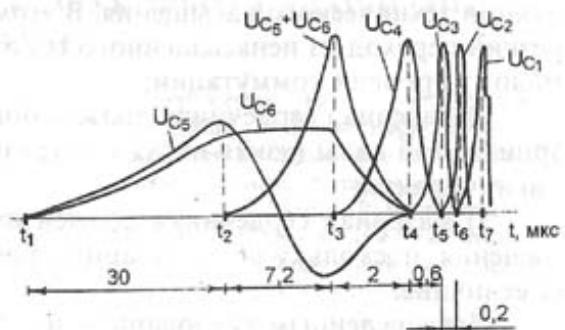


Рис.4. Эпюры напряжений на конденсаторах ступеней сжатия ЛИУ на магнитных элементах

$$t_3 - t_2 = \pi \sqrt{L_{\text{тр}} C_5}, \quad (10)$$

где  $L_{\text{тр}}$  – индуктивность вторичной обмотки импульсного трансформатора в насыщенном состоянии, должно быть согласовано с временем перемагничивания  $L_4$ , т.е. с его потокосцеплением  $\Psi_{L_4}$ :

$$t_3 - t_2 \approx \frac{\Psi_{L_4}}{U_1} = \frac{W S_1 \Delta B}{U_1}. \quad (11)$$

Здесь  $U_1$  – прикладываемое напряжение к  $L_4$ ;  $W$  – число витков дросселя;  $S_1$  – сечение сердечника;  $\Delta B$  – размах индукции.

Аналогично

$$t_4 - t_3 = \pi \sqrt{\frac{L_4 C_4 \frac{C_5}{2}}{C_4 + \frac{C_5}{2}}} \approx \frac{\Psi_{L_3}}{U_2} \quad (12)$$

при условии  $C_6 = C_5$ , где  $\Psi_{L_3}$  – величина потокосцепления  $L_3$ ;  $U_2$  – прикладываемое напряжение к  $L_3$ .

Таким образом, выбирая число витков и сечение стали дросселя, можно обеспечивать сжатие импульса напряжения  $C_0$  во времени с высоким КПД ~ 80–90% и производить зарядку формирующей линии  $C_1$  за время порядка сотен наносекунд.

Магнитный коммутатор  $L_1$  должен иметь характеристику идеального ключа, то есть удовлетворять следующим требованиям:

1) магнитный сердечник должен иметь высокий коэффициент прямоугольности петли гистерезиса, то есть отношение остаточной индукции к индукции технического насыщения. В этом случае имеет место ярко выраженный резкий переход из ненасыщенного состояния в насыщенное, что соответствует малому времени коммутации;

2) материал сердечника должен обладать возможно малой величиной коэрцитивной силы (узкая петля гистерезиса) для уменьшения потерь при перемагничивании;

3) материал сердечника должен иметь высокую величину индукции насыщения, поскольку вес и габариты коммутатора обратно пропорциональны ее величине.

Перечисленным требованиям из имеющихся материалов наилучшим образом удовлетворяют железоникелевые сплавы – пермаллои. Для коммутаторов  $L_1$  разработанных ускорителей использована лента из сплава 50НП толщиной 0,1 мм и шириной 25 мм.

В зависимости от требуемой длительности импульса высокого напряжения и длительности импульса разряда первичного накопителя  $C_0$  может использоваться различное число ступеней сжатия.

Предельная частота повторения импульсов ограничена временем “обратного хода” петли гистерезиса дросселей насыщения и сердечника импульсного трансформатора. Она может быть доведена в режиме пачек импульсов до  $3 \cdot 10^3$  Гц, что недоступно другим типам сильноточных ускорителей.

В настоящее время в НИИ ядерной физики при ТПУ проводятся пусконаладочные работы линейного индукционного ускорителя, в котором с целью уменьшения массогабаритных параметров элементы высоковольтной части, магнитного импульсного генератора, импульсного трансформатора, индуктивность размагничивания размещены в едином корпусе – металлическом цилиндре диаметром 700 мм, длиной 1600 мм, массой 800 кг.

В таблице представлены несколько вариантов ЛИУ, разработанных в НИИЯФ при ТПУ по заказу различных организаций и работающих на различные нагрузки при разной частоте следования импульсов  $f$ .

В заключение перечислим сотрудников лаборатории 53 НИИЯФ, спроектировавших и исследовавших как отдельные узлы, так и ускорители в целом: Васильев В.В., Канаев Г.Г., Луконин Е.И., Томских О.Н., Цыганков В.В., Пацевич В.В., Митюшкина В.Ю., Гусельников В.И., Мащенко А.И., Слинко В.Н.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christofilos N. // Rev. Sci. Instr. – 1964. – V.53. – №7. – P.885.
2. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. – М.: Атомиздат, 1978. – С.245.
3. Фурман Э.Г. // ПТЭ. – 1987. – №5. – С.26.
4. Фурман Э.Г., Васильев В.В. // ПТЭ. – 1988. – №1. – С.11.
5. Фурман Э.Г., Васильев В.В., Томских О.Н., Королев А.А. и др. // ПТЭ. – 1993. – №6. – С.45.
6. Томских О.Н., Фурман Э.Г. // ПТЭ. – 1991. – №5. – С.136.
7. Васильев В.В., Фурман Э.Г. // ПТЭ. – 1992. – №6. – С.158.