

## Безжелезные линейные индукционные ускорители

ПАВЛОВСКИЙ А. И., БОСАМЫКИН В. С.

УДК 621.384.6.03

В последние годы достигнут значительный прогресс в области импульсной ускорительной техники. Пучки релятивистских электронов используются при разработке новых методов ускорения, поисках путей осуществления управляемого термоядерного синтеза, а также для генерирования тормозного и микроволнового излучений. Особенно быстро развиваются сильноточные электронные ускорители прямого действия, которые позволяют получать высокую интенсивность электронных потоков и обеспечивают эффективную передачу энергии из источника питания в пучок ускоренных частиц. Вместе с тем максимальная энергия электронов в ускорителях прямого действия ограничивается электропрочностью системы по отношению к полному ускоряющему напряжению.

Для получения мощных одиночных импульсов тока ультрарелятивистских электронов целесообразно использовать безжелезные линейные индукционные ускорители (ЛИУ). Полное напряжение в таких ускорителях, состоящих из однотипных элементов-индукторов, как и в ускорителях с ферромагнитными сердечниками [1, 2], действует только вдоль ускорительного тракта. Безжелезные линейные индукционные ускорители позволяют освоить область энергий выше  $10^7$  эв при сохранении больших токов, свойственных разработанным в последнее время наносекундным ускорителям прямого действия. Первый ускоритель такого типа [3] обеспечивал ток пучка электронов до 2 кА при энергии 2 Мэв и частоте ускоряющего напряжения 6,2 МГц. Элементы конструкции этого ускорителя и условия проводки пучка описаны в работах [4—7].

В настоящей работе обсуждаются возможные схемы, а также электродинамические и конструктивные особенности индукторов безжелезных ЛИУ.

### Индукторы на основе тороидальных контуров

В ускорителях прямого действия электрическое поле возникает при верераспределении зарядов между двумя изолированными первоначально нейтральными проводниками. Наиболее существенное отличие линейных индукционных ускорителей состоит в возбуждении электрического поля между двумя участками внутренней поверхности единой замкнутой прово-

дящей полости, которая одновременно играет роль электромагнитного экрана. Напряжение на концах линии, соединяющей по объему какие-либо две точки, принадлежащие поверхности экрана, составит

$$U = \oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^N \Phi_i, \quad (1)$$

где  $\Phi_i = \int_{S_i} \mathbf{B} d\mathbf{S}$  — величина одного из магнитных потоков, пронизывающих площадь между этой линией и экраном.

Простейший безжелезный индуктор представляет собой одновитковый трансформатор с первичным контуром в виде проводящего тора, который возбуждается внешним источником переменного тока [8]. Вторичный контур, также имеющий тороидальную конфигурацию, концентрирует э. д. с. индукции в ускоряющем зазоре. Для уменьшения потерь толщина проводящих стенок торов должна быть больше глубины скин-слоя на рабочей частоте. Если в качестве источника питания используются одна или несколько соединенных параллельно длинных линий с волновым сопротивлением  $\rho$ , энергия  $W_{R_2}$ , рассеянная в сопротивлении нагрузки за время  $t$ , зависит от коэффициента связи, индуктивности первичного контура  $L_1$ , а также от активных сопротивлений первичного и вторичного контуров. Анализ случая идеальной связи (без учета потерь энергии в линии и коммутаторе), где

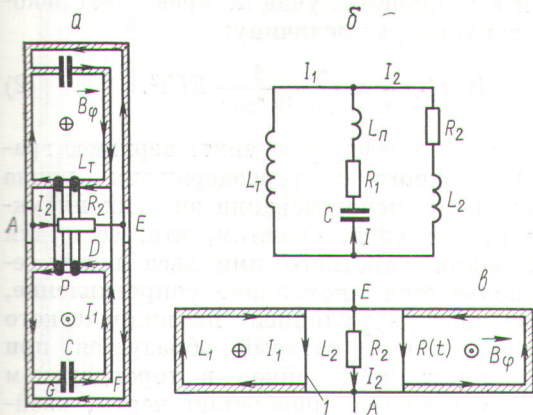
$$W_{R_2} = \frac{U_0^2}{2\rho} \frac{L_1}{\rho + R_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\rho R_2}{L_1(\rho + R_2)} t\right) \right],$$

показывает, что к. п. д. индуктора стремится к единице при достаточно малой длительности однополярного импульса  $t \ll L_1/\rho$  и согласованной нагрузке.

В ряде случаев, например при возбуждении многих индукторов одним источником питания, целесообразны многовитковые системы [9].

Для повышения напряженности ускоряющего электрического поля выгодно объединить все элементы, образующие первичную цепь импульсного безжелезного трансформатора — соединительные цепи, конденсаторы и коммутатор, в одновитковый тороидальный колебательный контур [10]. Один вариант такого индуктора показан на рис. 1, а. Переменный магнитный





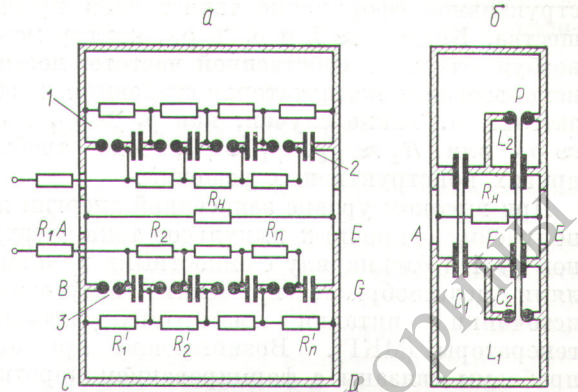
Р и с. 1. Конструктивная (а) и эквивалентная (б) схемы безжелезного индуктора; в — тороидальный индуктивный накопитель с разрывом токового контура.

1 — узел разрыва (фольга); P — коммутатор.

поток возбуждается при разряде кольцевого конденсатора  $C$  на индуктивность  $L_T$  тора, в азимутальном зазоре которого расположен кольцевой коммутатор  $P$ . Заземленная пластина первичного контура одновременно является частью вторичного.

При срабатывании коммутатора ток нагрузки  $I_2$  течет по пути АЕFGDA, не охватывающему магнитный поток  $\Phi = L_T I_1$  в первичном контуре. Конденсатор  $C$  (заряженная емкость зазора DE включена параллельно  $C$ ) таким образом непосредственно разряжается через нагрузку  $R_2$ . Эквивалентная схема индуктора с частично объединенными контурами приведена на рис. 1, б. Если в азимутальном разрыве тора, например в коммутаторе, имеется сосредоточенная индуктивность рассеяния  $L_{\Pi}$  с нетороидальным магнитным потоком или активное сопротивление  $R_1$ , электрическое поле от протекания полного тока ( $I = I_1 + I_2$ ) имеет направление, противоположное полю, распространяющемуся из конденсатора. Соответственно этому уменьшается ускоряющее напряжение. Те же результаты получаются при рассмотрении переходных процессов с использованием взаимной индуктивности контуров ( $M = L_T$ ). Ускоряющая система может работать в колебательном либо аperiodическом режиме, реализующемся при большой первичной индуктивности  $L_T$ . В обоих случаях, если пренебречь индуктивностью вторичного контура  $L_2$  и паразитной индуктивностью  $L_{\Pi}$ , выражение для к. п. д. имеет вид:

$$\eta = \frac{\rho_1^2 R_2}{(\rho_1^2 + R_1 R_2)(R_1 + R_2)}, \quad \rho_1 = \sqrt{L_T / C}.$$



Р и с. 2. Индукторы:

а — на основе генераторов импульсных напряжений Аркадьева — Маркса; б — на основе генераторов с перезарядкой кольцевых конденсаторов; 1 — генераторы импульсных напряжений; 2 — конденсаторы; 3 — искровые промежутки;  $R_1, \dots, R_n$  и  $R'_1, \dots, R'_n$  — зарядные резисторы.

Вся запасенная энергия рассеивается в нагрузке при  $R_1 = 0$ . Когда  $R_1 > 0$ , к. п. д. максимален при  $R_2 = \rho_1$ . Область изменения частоты индуктора в колебательном режиме

$$[(L_{\Pi} + L_T) C]^{-1/2} \leq \omega \leq \left[ \left( L_{\Pi} + \frac{L_T L_2}{L_T + L_2} \right) C \right]^{-1/2}.$$

Индуктор может быть образован параллельно соединенными синхронизованными генераторами импульсных напряжений по схеме Аркадьева — Маркса [11]. Высокое напряжение внутри первичного контура относительно заземленного экрана BCDG (рис. 2, а) существует во время последовательного срабатывания искровых зазоров, затем оно уравнивается э. д. с. самоиндукции. На рис. 2, б показана схема индуктора на основе генератора с перезарядкой одного из кольцевых конденсаторов  $C_2$  через тороидальную индуктивность  $L_2$ . Кольцевой коммутатор  $P$  является составной частью активного ( $L_2, C_2$ ) и пассивного ( $L_1, C_1$ ) контуров. Если емкость конденсаторов одинакова, индуктивность  $L_1$  должна быть существенно больше индуктивности  $L_2$ . Подобные схемы позволяют увеличить выходное напряжение каждого индуктора при том же зарядном напряжении.

Для индукторов с объединенными элементами первичного контура существует область изменения параметров ( $d \ll \lambda$ , где  $d$  — характерный размер индуктора;  $\lambda$  — длина волны собственных колебаний;  $\rho_C \ll \rho_1$ ,  $\rho_C$  — волновое сопротивление конденсатора, а также  $R_2 \gg \rho_C$ ), за пределами которой обсуждаемое кон-



структивное оформление теряет свои преимущества. Когда  $d \approx \lambda$  и  $\rho_1 \gg \rho_C$ , контур может возбуждаться на собственной частоте, поэтому использование коммутаторов становится необязательным. Такие случаи, как  $\rho_1 \gg \rho_C$ ,  $R_2 \approx \rho_C$  или  $R_2 \approx \rho_C$ ,  $\rho_1 \approx \rho_C$ , тоже требуют других конструктивных решений.

При высоком уровне запасенной энергии для получения одиночных импульсов тока электронов ( $\geq 1$  Мдж) наряду с емкостными накопителями целесообразно применять энергоемкие источники питания — магнитокумулятивные генераторы (МКГ). Возникающие при этом проблемы связаны с формированием коротких ( $\leq 10^{-6}$  сек) импульсов напряжения. Один из путей — применение МКГ как зарядного устройства для быстрых емкостных накопителей. С точки зрения повышения удельной энергоемкости могут оказаться перспективными жидкие диэлектрики, подвергающиеся импульсному воздействию давления [12].

Для формирования высоковольтных импульсов длительностью  $\sim 10^{-7}$  сек в индуктивных накопителях применим также метод, использующий явление электрического взрыва проводников [13]. Магнитная энергия на конечной стадии работы МКГ запасается в замкнутом тороидальном контуре, составной частью которого является фольга или параллельно соединенные проволочки (рис. 1, в). Длительность импульса напряжения зависит от индуктивности контура  $L_1 = L_T$ , времени фазового перехода  $t_p$  и электропрочности узла разрыва; амплитуда увеличивается соответственно росту активного сопротивления  $U = IR(t)$ . При переброске тока во вторичный контур ( $L_2, R_2$ ) значительная доля энергии теряется на разрыв. В этом случае энергетически выгоден режим, когда время разрыва много меньше времени затухания тока:  $t_p \ll \frac{L_1 + L_2}{R_2}$ . При одновременном разрыве тока в нескольких последовательно соединенных тороидальных контурах напряжение вдоль их оси суммируется, как и в других линейных индукционных системах. Очевидно, что наибольший к. п. д. ускорителя может быть реализован, если сам узел разрыва используется в качестве источника электронов ( $L_2 = 0$ , см. рис. 1, б), причем геометрия контура при прочих равных условиях обеспечивает максимальную мощность энерговыделения. Диссипация в узле разрыва накопленной магнитной энергии  $W$  за время  $t$  сопровождается возникновением амплитуды напряжения  $U$  при средней напряженности электрического поля на разрыве  $E$ ,

которая в реальном случае не превышает некоторую допустимую величину:

$$W \leq \frac{\varphi^2}{2L_1} \approx \frac{\pi}{\mu_0} \frac{1}{\ln r_2/r_1} EUt^2. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет оценить верхнюю границу возможного энергосодержания пучка электронов при использовании энергии индуктивных накопителей. Отметим, что, если для формирования короткого импульса напряжения используется аномальное сопротивление, обусловленное кумуляцией цилиндрического плазменного слоя, который образуется при взрыве тонких проводников в тороидальном контуре, устройство приобретает черты, свойственные установкам с «плазменным фокусом».

### Индукторы на линиях с распределенными параметрами

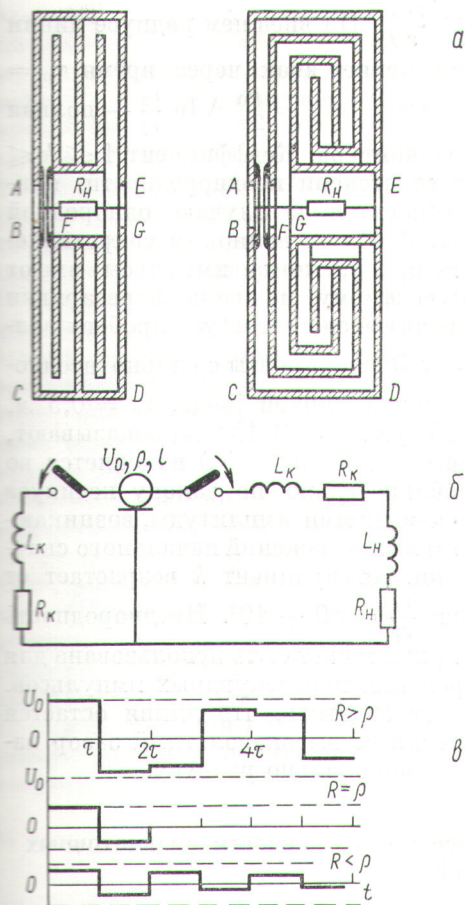
Минимальная длительность импульса в колебательном контуре определяется временем распространения электромагнитной волны по диэлектрику емкостного накопителя. В этом случае при рассмотрении переходных процессов в индукторе необходимо учитывать особенности, свойственные длинным линиям.

На рис. 3, а представлены схемы индукторов на линиях с распределенными параметрами ( $\rho_C \approx \rho_1$ ), которые образованы высоковольтной пластиной  $F$  и заземленным экраном [14]. При замыкании кольцевого коммутатора  $BF$  линия  $FG$  оказывается подключенной к ускоряющему промежутку  $R_n$ . Переходные процессы в индукторе, если пренебречь неоднородностью тороидальной линии, аналогичны процессам в заряженном до  $U_0$  кабеле с волновым сопротивлением  $\rho$ , который замыкается с одного конца посредством коммутатора с индуктивностью  $L_K$  и сопротивлением  $R_K$ , а с другого одновременно начинает разряжаться (рис. 3, б) через последовательно соединенные нагрузку ( $L_n, R_n$ ) и коммутатор ( $L_K, R_K$ ). Коэффициенты отражения в такой схеме, если пренебречь индуктивностью коммутатора и нагрузкой, следующие:

$$K_K = \frac{\rho - R_K}{\rho + R_K} (R_K < \rho) \quad \text{и} \quad K_n = \frac{R - \rho}{R + \rho}.$$

На рис. 3, в показана идеализированная зависимость напряжения на нагрузке от времени для различных  $R = R_K + R_n$ . Учет неоднородности линии, индуктивности рассеяния и переходного сопротивления коммутатора приводит к сглаживанию скачкообразных измене-





Р и с. 3. Индукторы на линиях с распределенными параметрами ( $\rho_C \approx \rho_1$ ):

а — принципиальные схемы индукторов; б — электрическая схема; в — активная составляющая напряжения  $U_R$  в цепи нагрузки  $R = R_H + R_K$ .

ний напряжения и тока. Изменение магнитного потока в короткозамкнутой длинной линии обусловлено распространением токовой волны  $U_0 = -\dot{\varphi} = -i v L_{\text{пог}}$ , где  $L_{\text{пог}}$  — погонная индуктивность. Переменное магнитное поле в индукторе не связано с внешним пространством, так как оно заэкранировано металлическими пластинами и отделено от разомкнутого конца линии длиной ее незарядившейся части. Распределение электрического поля вне индуктора с идеальным кольцевым коммутатором определяется, таким образом, конфигурацией разомкнутого конца линии  $FG$ , а нагрузочные характеристики соответствуют разряду радиальной линии на импеданс ускоряющего зазора. Полагая, что активное сопротивление

индуктора сосредоточено в нагрузке и коммутаторе, можно получить выражение для коэффициента полезного действия:

$$\eta = \frac{W_{R_H}}{W_0} = \frac{2R_H \rho}{(R + \rho)^2} \frac{1 + K_K^2}{1 - K_K^2}; \quad W_0 = \frac{C U_0^2}{2}.$$

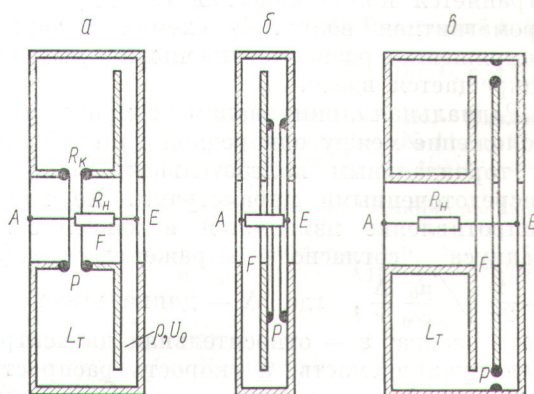
Поскольку для ускорения заряженных частиц обычно используются импульсы напряжения одной полярности, в пучок передается не более половины запасенной энергии. Можно повысить к. п. д. ускорителя, если использовать для ускорения только второй прямоугольный импульс напряжения при включении согласованной нагрузки. Некоторым недостатком этого метода является воздействие на ускорительную трубку первого ненагруженного импульса, амплитуда которого вдвое превышает амплитуду рабочего импульса напряжения.

Принципиальная и эквивалентная схема индуктора, у которого  $\rho_1 \gg \rho_C = \rho$ , показана на рис. 4, а. Линия, образованная высоковольтной пластиной  $F$  и заземленным экраном, с помощью коммутатора  $P$  одновременно подключается к сосредоточенной индуктивности тора  $L_T$  и резистивной нагрузке  $R_H$ .

Особенность этой схемы заключается в возможности формирования одиночных прямоугольных импульсов напряжения. К. п. д. индуктора

$$\eta = \frac{4R_H \rho}{(R + \rho)^2} \frac{1 + K_H^2}{1 - K_H^2}.$$

За время однополярного импульса напряжения в согласованной нагрузке при  $R_K = 0$  рас-



Р и с. 4. Индукторы:

а — на длинной линии с сосредоточенной индуктивностью первичного контура  $L_T$  ( $\rho_1 \gg \rho_C$ ); б — на двойной радиальной линии (коммутатор  $P$  удален от конца линии на четверть ее длины); в — на двойной линии с разделительной индуктивностью  $L_T$ .



сеивается вся энергия, накопленная емкостью линии. Очевидно, что предельный переход к аperiodическому режиму в индукторе (см. рис. 1, а) осуществляется при  $\rho_1 \gg R_n \gg \rho$ .

Ускоряющее напряжение индуктора повышается в два раза при размещении кольцевого коммутатора на некотором расстоянии от одного из концов линии (рис. 4, б), в частности, равном четверти ее длины. Напряженность электрического поля в области ускорения максимальна, если индуктор состоит всего из двух радиальных линий, а коммутатор  $P$  расположен на среднем радиусе индуктора. Когда токовая волна, распространяющаяся по короткой линии  $PE$ , достигает ускоряющего зазора  $AE$ , на согласованном сопротивлении формируется импульс напряжения, амплитуда которого равна зарядному напряжению. В течение первого импульса в нагрузку передается приблизительно половина запасенной в индукторе энергии. Можно сформировать на согласованной нагрузке однополярный импульс напряжения, если, разместив коммутатор на равных расстояниях от концов радиальной линии, увеличить время перезарядки одной из ее половин  $PF$  с помощью большой разделительной индуктивности  $L_T$  (рис. 4, в).

Помимо рассмотренных возможны схемы индукторов с передающими радиальными линиями, которые образуются, если увеличивать радиальные размеры заземленных пластин  $AB$  и  $EG$  между нагрузкой и кольцевым коммутатором  $BF$  (см. рис. 3, а). При срабатывании коммутатора по передающей линии распространяется цилиндрическая сходящаяся электромагнитная волна. В схемах с зарядным напряжением разного знака число коммутаторов сокращается вдвое.

Радиальная линия занимает промежуточное положение между однородной длинной линией и тороидальным колебательным контуром с сосредоточенными параметрами. Ее волновое сопротивление изменяется в зависимости от радиуса согласно выражению  $\rho_p(r) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} \frac{\Delta}{r}$ , где  $\Delta$  — длина высоковольтного зазора;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость, а скорость распространения электромагнитных волн остается постоянной. Если заряженная радиальная линия замыкается по оси проводящим каналом радиусом  $r_1$ , первоначальный скачок напряжения уменьшается по амплитуде в процессе движения волны, так что напряжение на фронте  $U(r) \approx$

$$\approx U_0 \left(1 - \sqrt{\frac{r_1}{r}}\right). \text{ На внешнем радиусе линии } r_2 \text{ напряжение меняет знак через время } \tau_p = k \sqrt{L_p C}, \text{ где } L_p = \frac{\mu_0}{2\pi} \Delta \ln \frac{r_2}{r_1} \text{ — полная}$$

индуктивность контура. Коэффициент  $1 \leq k \leq \pi$  зависит от степени неоднородности, причем  $k = 1$  относится к случаю однородной линии  $r_2 \approx r_1$ ,  $\Delta \ll r_1$  с волновым сопротивлением  $\rho_p(r) \approx \rho_p(r_1)$ , когда импульсы имеют прямоугольную форму и время перезарядки на внешнем радиусе соответствует пробегу волны  $\tau = \frac{r_2 - r_1}{v}$ . Эксперименты с сильно неоднородной радиальной линией [вода,  $r_2 = 0,5 \text{ м}$ ,  $r_1 = (10^1 \div 10^{-2}) \text{ м}$ ,  $\Delta = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ] показывают, что выходное напряжение  $U(r_2)$  изменяется во времени приблизительно по закону косинуса с малыми искажениями амплитуды, возникающими от повторных отражений начального скачка напряжения. Коэффициент  $k$  возрастает от 2,5 до  $\pi$  при  $\frac{r_2}{r_1} = 50 \div 10^3$ . Неоднородность радиальной линии может быть использована для трансформирования наносекундных импульсов. Однако следует отметить, что линия остается однородной, если ее высоковольтный зазор изменяется пропорционально радиусу.

### Энергетические возможности сильноточных ускорителей

Предельная энергия частиц, ускоренных в линейных индукционных ускорителях, определяется стоимостью установок и содержанием задач, решаемых с их помощью. Влияние времени пролета на энергию ускорения, особенно важное для тяжелых частиц и для электронов при энергии  $> 10^7 \text{ эв}$ , устраняется введением задержки включения каждого последующего индуктора на время  $\tau_3 \approx h/u$ , где  $u$  — скорость частиц;  $h$  — продольный размер индуктора. Рассмотренные схемы допускают использование жидких (вода, масло и т. п.), твердых и газообразных диэлектриков. Ускоряющая система ЛИУ может обладать большой энергоемкостью ( $> 10^6 \text{ Дж}$ ). Запасенная энергия оказывается рассредоточенной по многим независимым элементам, поэтому случайное нарушение изоляции одного из накопителей не угрожает работоспособности установки и существенному изменению первоначальных параметров.

Для ускорения электронов до энергий в десятки и более мегаэлектронвольт при токах пучка  $> 10^5 \text{ а}$  и длительности импульса  $\sim 10^{-7} \text{ сек}$



наиболее перспективными представляются системы на линиях с распределенными параметрами. Вклад каждого индуктора в полную энергию ускорения ограничен допустимой напряженностью электрического поля  $E_0$  в диэлектрике и условием получения импульсов напряжения, форма которых близка к прямоугольной:  $U_0 = E_0 \Delta \ll E_0 l$  (здесь  $l$  — длина линии, определяющая длительность импульса  $t$ ;  $\Delta \ll h$  — размер высоковольтного зазора). В качестве источников питания сильноточных ускорителей прямого действия также используются наносекундные генераторы на линиях коаксиальной или плоской геометрии, как правило, нагруженные на цилиндрический пучок небольшого по сравнению с радиальными размерами установки диаметра. Передача электромагнитной энергии в нагрузку с высокой удельной энергоемкостью и в этом случае определяется участком, представляющим собой радиальную линию. Отвлекаясь от неоднородности линий, оценим энергетические возможности единичного элемента ускорителя. С помощью передающей радиальной линии, по которой распространяется волна напряжения амплитудой  $U = E\Delta$ , за время  $t$  в согласованную нагрузку (полый цилиндр радиусом  $r_1$ ) можно передать энергию

$$W \leq \epsilon \epsilon_0 E^2 \pi (r_2^2 - r_1^2) \Delta = \frac{\pi}{\mu_0} E U t^2 \left( 1 + 2 \frac{r_1 \sqrt{\epsilon}}{ct} \right).$$

За то же время из заряженной до  $U_0 = 2U$  формирующей линии, подключенной непосредственно к нагрузке, передается энергия

$$W \leq \frac{\pi}{2\mu_0} U E_0 t^2 \left( 1 + 4 \frac{r_1 \sqrt{\epsilon}}{ct} \right), \quad E_0 = \frac{U_0}{2\Delta},$$

вдвое меньшая при малых  $r_1$ . Приведенные выражения определяют верхний предел энерговыделения также для совокупности линий, образующих источник питания безжелезного ЛИУ, или ускорителя прямого действия с ускоряющим напряжением  $NU$ . Представляется естественным их сходство с выражением (2) для индуктивного накопителя с разрывом токового контура. При заданной напряженности электрического поля, которая зависит от электропрочности конструкции, и выбранном ускоряющем напряжении мощность уско-

рителей на линиях с распределенными параметрами можно повысить только за счет увеличения радиальных размеров линий и нагрузки. Таким образом, электропрочность известных в настоящее время диэлектриков ограничивает возможности концентрации энергии с помощью подобных сильноточных ускорителей, что особенно существенно, если требуются короткие ( $\leq 10^{-8}$  сек) импульсы тока электронов.

В заключение отметим, что широко используемая в ускорительных трубках дополнительная концентрация напряжения металлическими электродами, по-видимому, применима для систем с поперечным размером области ускорения, сравнимым с высоковольтным зазором источника питания. Когда длина области ускорения значительно превышает ее поперечный размер, что отмечается в ЛИУ при энергиях ускорения  $> 10^7$  эв, выгоднее отбирать энергию от источника питания посредством нагрузки с распределенным по всей длине активным сопротивлением. Таковой нагрузкой, в частности, и является пучок электронов.

Поступила в Редакцию 19/XI 1973 г.  
В окончательной редакции 1/IV 1974 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christofilos N. e. a. Rev. Scient. Instrum., 1964, v. 35, № 7, p. 886.
2. Анацкий А. И. и др. «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 6, с. 439.
3. Павловский А. И. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 28, вып. 5, с. 432.
4. Босамыкин В. С. и др. «Газоразрядные приборы», 1970, № 2(18), с. 94, 95.
5. Павловский А. И. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1970, т. 2, с. 122.
6. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Павловский А. И. «Бюлл. изобрет.», 1970, № 31, с. 216.
7. Босамыкин В. С. ЖТФ, 1970, т. 40, вып. 6, с. 1173; 1971, т. 41, вып. 3, с. 539.
8. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Павловский А. И. «Бюлл. изобрет.», 1970, № 11, с. 214.
9. Босамыкин В. С., Павловский А. И. «Бюлл. изобрет.», 1972, № 2, с. 177.
10. Босамыкин В. С. и др. «Бюлл. изобрет.», 1967, № 23, с. 68.
11. Босамыкин В. С. «Бюлл. изобрет.», 1969, № 9, с. 174.
12. Абрамян Е. А. и др. «Докл. АН СССР», 1971, т. 201, № 1, с. 56.
13. Maisonnier C. e. a. Rev. Scient. Instrum., 1966, v. 37, № 10, p. 1380.
14. Босамыкин В. С., Павловский А. И. «Бюлл. изобрет.», 1971, № 34, с. 223.