

$$D_y = - (4\pi)^2 \frac{\frac{T}{C^{V, D, B}} \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_{T, E, H}}{(\chi^{T, V, H}) (\chi^{T, V, E}) - (\chi^{T, V})^2}. \quad (13)$$

Выражение (13) для  $D_y$  отражает (с учетом (10)) статистическую природу детерминанта устойчивости системы, молекулы которой имеют одновременно электрические и магнитные диполи:  $D_y$  обратно пропорционален квадратичной функции флуктуаций произведения ориентаций электрических и магнитных диполей относительно направления внешних полей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гиббс Д. В. Термодинамические работы. М.—Л., ГИТТЛ, 1950.
2. Семенченко В. К. «Журн. физ. химии», 21, 1461, 1947; 31, 1420, 1957; 33, 1440, 1959; 33, 1384, 1960; 34, 1649, 1960.
3. Семенченко В. К. «Изв. АН СССР», химические науки, № 2, 368, 1959; № 11, 2048, 1959.
4. Семенченко В. К. «Избранные главы теоретической физики». М., «Просвещение», 1966.
5. Семенченко В. К. «Кристаллография», 9, 611, 1964.
6. Семенченко В. К., Гальцев В. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 11, № 2, 1970.

Поступила в редакцию  
8.4 1970 г.

Кафедра  
физики кристаллов

В. К. ГРИШИН, В. Г. СУХАРЕВСКИЙ

## О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Среди всевозможных устройств, предназначенных для получения мощных токов ускоренных частиц, весьма перспективными являются линейные индукционные ускорители (ЛИУ) [1, 2]. Относительная простота устройства чрезвычайно расширяет область применения ЛИУ. Препятствием служит излишняя громоздкость системы. Так, в ускорителе ЛИУ-3000 [2] прирост энергии ускорения на единицу длины установки составляет всего

$$\frac{dE}{dz} \sim 300 \text{ кэВ/м} \quad (1)$$

при диаметре индукторов более полуметра.

Столь малая «производительность» не связана с принципиальными ограничениями метода, а скорее является данью новизне идеи, впервые находящей техническое воплощение.

Величина вихревой э. д. с. в ЛИУ зависит от скорости изменения магнитного потока, охватывающего пространства ускорения. ЛИУ состоит из системы кольцевых индукторов, на каждый из которых подается импульс электрического напряжения. Схематически кольцевой индуктор представляет собой виток тока, захватывающего кольцевой магнитный сердечник, а весь ускоритель есть линейный набор одновитковых трансформаторов [1, 2]. При импульсном разряде батареи через индуктор максимальное значение параметра  $dE/dz$  приблизительно равно

$$\frac{dE}{dz} \approx B_{\text{нас}} \frac{\Delta r \eta}{T}, \quad (2)$$

где  $B_{\text{нас}}$  — индукция насыщения материала сердечника,  $\Delta r$  — разности максимального и минимального радиусов сердечника,  $T$  — время импульса,  $\eta$  — коэффициент «упаковки» индукторов вдоль ускорителя.

Очевидно, что для повышения  $dE/dz$  необходимо значительно уменьшить время изменения магнитной индукции (в ЛИУ-3000,  $T \sim 0,5$  мксек). Однако это невозможно сделать, используя традиционные магнитные материалы, применяемые в импульсных трансформаторах.

По-видимому, здесь могут быть использованы высокочастотные ферриты или магнито-диэлектрики, частотная полоса поглощения в которых лежит выше 100 мгц [3]. Индукция насыщения лучших образцов составляет 3÷5 тыс. гс (0,3÷0,5 тл). Согласно (2), эти параметры гарантируют возрастание  $dE/dz$  не менее чем на порядок.

Дальнейшее повышение эффективности ЛИУ можно достичь путем перехода к колебательному режиму питания индукторов, хотя при этом и встречаются определенные трудности. Каждый индуктор включается в колебательный контур, питаемый внешним генератором.

Осцилляторный режим работы позволяет увеличить прирост  $dE/dz$ , так как размах изменения потока индукции удваивается. При этом достигается практически целесообразное значение  $\frac{dE}{dz} \sim 2 \div 3$  мэв/м, так что по показателю  $\frac{dE}{dz}$  ЛИУ вполне способен соперничать с волноводными линейными ускорителями.

Для оценки практической конкурентной способности «резонансных» ЛИУ необходимо рассмотреть энергетический баланс установки. Как известно, мощность  $P$ , потребляемая в течение цикла ускорения, равна

$$P = \frac{2\pi f \cdot W}{Q} + I \cdot E, \quad (3)$$

где  $W$  — энергия, запасаемая в системе,  $f$  — частота,  $Q$  — добротность колебательной системы,  $I$  — средний ток пучка,  $E$  — энергия ускорения (в вольтах). Здесь  $\frac{2\pi f W}{Q}$  определяет собственные потери в контуре,  $I \cdot E$  — мощность, уносимая ускоряемым током.

Величина электромагнитной энергии, запасаемой в колебательной системе ускорителя, определяется энергией ускорения, причем [5]

$$W = \frac{E^2}{2 \cdot L \cdot f^2}, \quad (4)$$

где  $L$  — численный фактор (в ЛИУ имеющий смысл самоиндукции всей системы индукторов).

Для волноводных электронных ускорителей (ЛВУ)  $f \sim 3000$  мгц,  $Q \sim 10^4$  [6]. Добротность колебательных контуров ЛИУ будет определяться потерями в ферритах, которые, к сожалению, весьма значительны, так что добротность не будет превосходить 50÷100. Соответственно, при частоте  $f \sim 30$  мгц требуемая величина запасаемой энергии, а также мощность потерь в колебательной системе ЛИУ окажется примерно на два порядка выше, чем ЛВУ, рассчитанному на ту же энергию (при сравнении следует учесть, что  $L$  в (4) для ЛИУ существенно больше, так как магнитная проницаемость в. ч. материалов  $\sim 100$ ).

Следовательно, ЛИУ может быть сравнимо по к. п. д. с электронными ЛВУ при токах (в импульсе) на два-три порядка выше, т. е.  $\sim 10$  а. Повысив ток до десятков ампер<sup>1</sup>, можно значительно превзойти ЛВУ по общей интенсивности ускоренных пучков при достаточном к. п. д. (порядка нескольких десятых). Правда, для этого потребуются мощности в десятки Мэвт/мэв в импульсе.

Заметим, что в ЛВУ повышение импульсной интенсивности уже до (0,1÷1 а) требует существенной перестройки всей системы, усложняющей наладку и эксплуатацию установки (см. [7] с подробным описанием). В настоящее время разработаны лампы в несколько Мэвт вплоть до частот в 100 мгц [4]. И сейчас уже не кажется, что магнетронная и клистронная техника, применяемая в ЛВУ, дает какие-либо особые преимущества в компактности оборудования, стабильности в работе и т. д. [4, 7, 8].

Вместе с тем в установках на сверхмощные импульсные токи в сотни ампер следует отдать предпочтение импульсной схеме питания с использованием неоднородных линий, обладающих большой эксплуатационной надежностью [2]. При длительности импульсов в десятки нсек такие ЛИУ способны дать значительно большую интен-

<sup>1</sup> В настоящее время разработаны электронные инжекторы, позволяющие получать токи до сотен ампер. Поперечная фокусировка таких пучков осуществляется, например, с помощью дополнительного аксиального магнитного поля [2, 4].

«сивность токов, практически не уступая ЛВУ по другим параметрам ( $dE/dz$ , размеры и т. д.).

Возможно, еще большие перспективы для использования рассматриваемых типов ЛИУ имеются при ускорении тяжелых частиц. В обычных линейных ускорителях с пролетными трубками  $f \sim 200\text{--}400$  мгц,  $Q \sim 50$  тыс., но значителен объем резонаторов. Поэтому потери в ЛИУ и в ускорителях с пролетными трубками почти сравнимы. К тому же последние обладают сравнительно невысоким параметром  $dE/dz \sim 2\div 3$  мэв/м [4, 8]. Кроме того, в них, как и в других традиционных ускорителях, например, прямого действия, встречаются значительные трудности при повышении интенсивности пучков. Следовательно, ЛИУ для тяжелых частиц уже при токе  $\sim 1$  а могут превзойти по своим показателям ускорители других типов.

Таким образом, используя новые магнитные материалы и режимы питания, можно утверждать, что модифицированные ЛИУ не уступят по своей эффективности другим ускорителям. Относительная простота устройства, высокая интенсивность пучка, снисходительные требования к допускам (так, температурный режим должен поддерживаться в пределах  $\pm 10^\circ$ ), возможность быстрой перестройки установки для ускорения частиц различного сорта (или даже их одновременного ускорения) позволяют надеяться, что предлагаемые ЛИУ найдут широкое применение в научных экспериментах и технике.

Авторы выражают благодарность А. А. Коломенскому за полезные обсуждения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Christofilos N. Труды Международной конференции по ускорителям высоких энергий. М., Атомиздат, 1964, стр. 1073.
2. Анацкий А. И., Богданов О. С. и др. «Атомная энергия» **21**, 439, 1966.
3. «Ферриты и магнитодиэлектрики». М., «Советское радио», 1968.
4. Сб. «Ускорители». Под редакцией Б. Н. Яблокова. М., 1962.
5. Стреттон Д. А. Теория электромагнетизма. Гостехиздат, 1948.
6. Труды Международной конференции по ускорителям. М., 1964, стр. 407—435.
7. Воронков Р. М., Бойко В. А. и др. «Атомная энергия», **26**, стр. 348, 1969.
8. Ядерная физика. Под ред. Л. А. Арцимовича. М., Физматгиз, 1963, стр. 208.

Поступила в редакцию  
25.7 1969 г.

Кафедра  
ускорителей