

Сильноточный ускоритель электронов микросекундного диапазона

ДУБОВОЙ Л. В., РОЙФЕ И. М., СЕРЕДЕНКО Е. В., СТЕКОЛЬНИКОВ Б. А., ШАПИРО В. Б.

УДК 537.533.2

В настоящее время для получения сверхмощных импульсных потоков электронов применяются главным образом схемы, использующие энергию, запасаемую в конденсаторах или длинных линиях.

Существующие оценки показывают, что в различных областях применения высоковольтной импульсной техники предел экономической целесообразности накопления энергии в электрическом поле для известных диэлектриков составляет 10^7 дж. Дальнейшее повышение энергии в принципе становится экономически целесообразным при переходе к использованию энергии магнитного поля, запасаемой в обмотках соленоидов (индуктивные накопители). Впервые идея использования индуктивных накопителей в схемах ускорителей заряженных частиц была высказана Е. Г. Комаром и О. А. Гусевым в 1969 г. Реально создание сильноточных ускорителей электронов с индуктивным накопителем долгое время тормозилось вследствие отсутствия надежных быстродействующих размыкателей тока, появившихся сравнительно недавно в связи с разработкой импульсных систем питания сильноточных разрядов. Например, в работе [1] рассматривается размыкатель, работающий в схеме индуктивного накопителя на уровне 10^4 дж.

Основные особенности сильноточного ускорителя с питанием от индуктивного накопителя удобно проанализировать на схеме накопителя-трансформатора (рис. 1), имеющего первичную низковольтную обмотку с индуктивностью L_1 и вторичную высоковольтную обмотку с индуктивностью L_2 , которая непосредственно подключается к ускоряющему промежутку с эквивалентным значением сопротивления R_H . Для заряда индуктивного накопителя может быть использован любой импульсный низковольтный источник тока в цепи первичной обмотки.

Оценим основные характеристики предлагаемой схемы, воспользовавшись элементарной аппроксимацией процесса разрыва тока заряда в максимуме $I(t_{\text{макс}}) = I_0$ в виде

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

Здесь τ — характерное время размыкания [интервал времени, соответствующий уменьшению $I(t)$ в e раз].

Ниже приведены основные соотношения, справедливые для случая $\tau = \tau_H = \frac{L_2}{R_H}$, которые

связывают наиболее важные параметры схемы:

$$I_{\text{н. макс}} = -0,37 \frac{M}{L_2} I_0; \quad (1)$$

$$P_{\text{н. макс}} = 0,27 K^2 \frac{W_L}{\tau}; \quad (2)$$

$$\eta = 0,5 k^2 \gamma; \quad (3)$$

$$\frac{U_{2\text{макс}}}{U_{20}} = 0,25 \frac{t_{\text{макс}}}{\tau}; \quad (4)$$

где η — к. п. д. передачи энергии в пучок;

γ — к. п. д. заряда накопителя; $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ —

коэффициент связи трансформатора; $t_{\text{макс}}$ — время установления тока I_0 в L_1 ; $W_L = L_1 I_0^2 / 2$ —

энергия, запасенная в L_1 ; U_{20} — максимальное напряжение, возникающее на ускоряющем промежутке при включении источника заряда накопителя.

Рассмотренный частный случай соответствует максимуму мощности $P_{\text{н макс}}$, передаваемой от индуктивного накопителя электронному пучку.

Существенную роль в эффективности работы схемы играет величина коэффициента связи k . Обычно для получения $k \approx 1$ используют трансформаторы с железным сердечником. В рассматриваемом случае конструкции с безжелезным трансформатором оказываются более экономичными. Для безжелезных трансформаторов при $W_L \geq 10^7$ дж и $U_{2\text{макс}} \geq 10^6$ в размеры изолирующего зазора между обмотками становятся малыми по сравнению с габаритами накопителя, и реально легко достижимы величины $k \geq 0,9$.

Следует обратить внимание на опасность пробоя ускоряющего промежутка в процессе импульсной зарядки накопителя током. Как видно из соотношения (4), для ликвидации этой

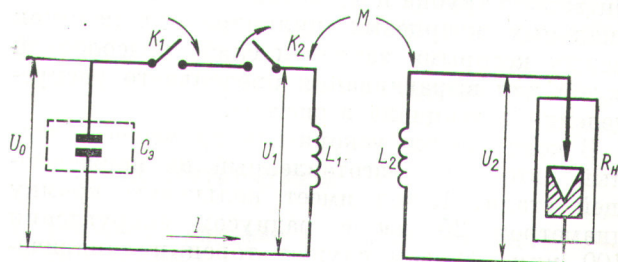


Рис. 1. Схема накопителя-трансформатора.

опасности желательнo максимально увеличивать $t_{\text{макс}}$. Если параметры элементов схемы (прежде всего размыкателя тока) этого не позволяют, необходимо включить последовательно с ускоряющим промежутком разрядник.

Важной характеристикой ускорителя является время размыкания тока τ . Успехи в разработке размыкателей, основанных на использовании взрывающихся фольг, позволяют принять $\tau = 10^{-5} - 10^{-7}$ сек в качестве минимальной длительности импульса, формируемого индуктивным накопителем с достаточно большим запасом энергии. Далее для оценки работы ускорителя может представлять интерес экспериментальный параметр $t_{\text{макс}}/\tau$ (4), справедливый при определенных допущениях, например при пренебрежении индуктивностью нагрузки и высокой добротности цепи заряда. Обычно при зарядке индуктивного накопителя от конденсаторной батареи $t_{\text{макс}}/\tau \approx 10$.

Конструктивные особенности ускорителя с высоковольтным питанием от накопителя-трансформатора можно рассмотреть на примере созданной в НИИЭФА модели ускорителя «Индус-1» (рис. 2), где источником заряда индуктивного накопителя служит конденсаторная батарея с суммарной емкостью $C = 5,6 \cdot 10^3$ мкф, $U_{\text{омакс}} = 5$ кв.

Батарея разряжается на первичный виток, закрепленный на стеклопластиковом баке ускорителя. В опытах $t_{\text{макс}} = 50$ мксек. В разрыв витка низковольтной первичной обмотки включены параллельно два размыкателя, использующие электрический взрыв медной фольги в кварцевом песке. Высоковольтная обмотка содержит 96 витков, разбитых на 12 секций. Оргстеклянные секции каркаса обмотки разделены электрическими экранами, выравнивающими распределение напряжения вдоль обмотки при разряде накопителя на ускоряющий промежуток. Измеренный коэффициент связи между обмотками равен 0,6. Высоковольтная изоляция — конденсаторное масло. Ускорительная трубка представляет собой два коаксиальных кварцевых цилиндра, промежуток между которыми заполнен слабо подсоленной водой для выравнивания продольного распределения потенциала в системе.

В конструкции ускорителя применен холодный автокатод, изготовленный из нержавеющей стали. Катод имеет кольцевую кромку диаметром 25 мм с радиусом закругления 100 мм. Анодом служит торец цилиндрического вакуумного кожуха фокусирующего соленоида с внутренним диаметром 46 мм. Найден-

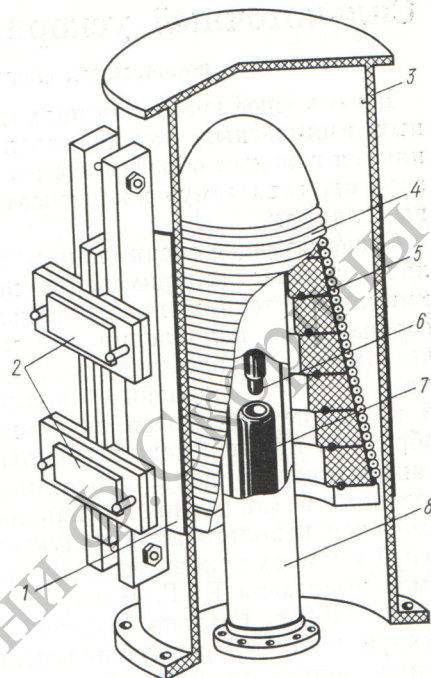


Рис. 2. Конструкция ускорителя:

1 — первичный виток; 2 — размыкатели; 3 — бак ускорителя; 4 — вторичная обмотка; 5 — секции каркаса обмотки; 6 — катод; 7 — анод; 8 — ускорительная трубка.

ное в опытах оптимальное расстояние между катодом и анодом (7,5 см) соответствует наибольшей длительности импульса тока при минимальных потерях электронов пучка в пролетном пространстве. Фокусирующий соленоид длиной 0,64 м имеет равномерную намотку.

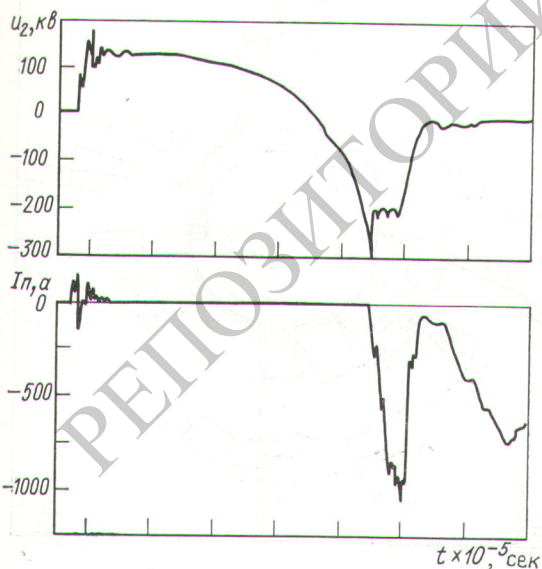
Как видно из рис. 2, ускоряющий промежуток находится в магнитном поле накопителя, которое вместе с магнитным полем фокусирующего соленоида служит для формирования и вывода пучка электронов. В оптимальных режимах работы ускорителя магнитное поле возрастает от 2 кэ на катоде до 8 кэ у торца анода, достигая 15 кэ в центральной части соленоида.

Большой градиент магнитного поля в области ускоряющего промежутка был использован сознательно, так как с самого начала предполагалось, что процесс торможения плазмы катодных факелов в таких условиях должен способствовать увеличению времени работы катода.

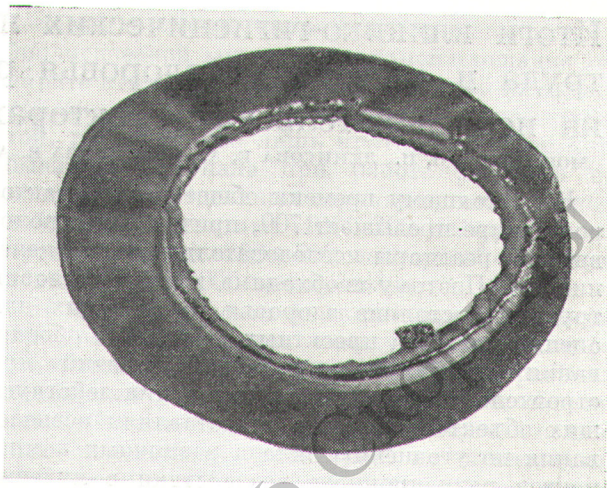
На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на ускорительной трубке и тока пучка, измеренного на расстоянии 0,5 м от ускоряющего промежутка с помощью шунта калориметра. Типичный режим испытания ускорителя $U_0 = 2,5$ кв, $U_{2\text{макс}} = 300$ кв и максимальная

величина выведенного пучка ~ 1 ка. Энергия выведенного пучка, измеренная с помощью калориметра, равна 1 кдж, η по выведенному пучку — 6% , $\tau = 5$ мксек. Оценка τ_n в этом режиме показывает, что $\tau_n \approx \tau$. Можно сравнить измеренные и расчетные величины системы (1—4). Для условия эксперимента рассчитанное значение $U_{2\text{макс}}/U_{20} = 2,5$ находится в удовлетворительном согласии с измеренным значением 3 , т. е. отличие от этой величины не превышает 20% . Измеренная величина $P_{n.\text{макс}}$ оказалась в полтора раза меньше расчетной. Несколько большее отличие получено для расчетной величины η , которая превышает в три раза измеренное на выходе из фокусирующего соленоида. Предварительный анализ результатов измерений показывает, что отклонения расчетных величин $P_{n.\text{макс}}$ и η обусловлены не столько отклонением формы кривой размыкания тока в эксперименте от принятой аппроксимации, сколько особенностями условий прохождения тока в ускоряющем зазоре.

Сопоставление данных, приведенных на рис. 3, с результатами исследований работы [2] показывает, что достигнутая в опытах длительность импульса тока электронного пучка $\tau \approx 5$ — 7 мксек ограничивается процессом закорачивания ускоряющего промежутка плазменным облаком, движущимся со стороны катода. Оценка средней скорости движения катодной



Р и с. 3. Осциллограммы напряжения на ускорительной трубке и тока выведенного пучка.



Р и с. 4. Алюминиевая фольга после воздействия электронного пучка.

плазмы дает величину, несколько меньшую 10^6 см/сек, что находится в удовлетворительном соответствии с результатами измерений работы [2].

Следует отметить, что полученные в экспериментах неожиданно большие времена работы автокатада ($\tau \lesssim 10^{-5}$ сек) указывают на безусловную перспективность исследований, направленных на дальнейшее увеличение предельного времени импульсной работы холодных катодов в схемах высокопоточных электронных ускорителей.

О форме выведенного пучка можно судить по отверстию, выплавленному пучком в алюминиевой фольге толщиной $0,2$ мм, установленной у входа в калориметр (рис. 4). Диаметр отверстия в фольге (2 см) оказался близким к диаметру катода.

В заключение следует отметить целесообразность строительства крупных ускорителей электронов с питанием от индуктивных накопителей с использованием элементов рассмотренной схемы.

Авторы благодарят В. А. Глухих за постоянную поддержку и обсуждение результатов работы.

Поступила в Редакцию 31/1 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dimareo J., Burkchart L. J. Appl. Phys., 1970, v. 41, N 9, p. 3894.
2. Friedman M., Ury M. Rev. Scient. Instrum., 1972, v. 43, N 11, p. 1659.