

A. 16

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР.

препринт 22

Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман

**Сильноточный импульсный ускоритель
электронов**

НОВОСИБИРСК 1966

+

А н н о т а ц и я

Описана схема импульсного ускорителя прямого действия с трансформатором Тесла в качестве источника высокого напряжения, со встроенной в трансформатор ускорительной трубкой, позволяющего получать электронные токи до сотен ампер при энергии несколько Мэв и длительности импульсов в диапазоне 10^{-9} - 10^{-5} сек. Система позволяет работать как с одиночными импульсами тока, так и при частоте повторения до сотен герц.

Описана экспериментальная установка ЭЛИТ-1, на которой получен электронный ток 35 ампер с энергией 1 Мэв при длительности импульсов 2 мксек и частоте повторения 10 гц. Средняя мощность пучка при этих параметрах составила 0,7 квт.

E. Abramjan, S. Vasserman.

High-Current Impulse Electron Accelerator.

Summary

The scheme of pulse accelerator with TESLA transformer as a high voltage source and mounted inside the transformer vacuum tube is described. Electron current up to hundreds amp with an energy of several Mev and pulse length time of 10^{-9} - 10^{-5} sec may be achieved. The repetition rate from single pulses up to hundreds cps may be obtained.

The experimental machine ELIT-1 is described on which electron beam with current 35 amp at 1 Mev, pulse length time 2 μ sec and repetition rate 10 cps was achieved. The average beam power at these values was 0,7 kw.

В настоящее время известны различные способы ускорения в коротких импульсах электронных токов в сотни ампер до энергий несколько Мэв /1-3/. Как правило, установки для этих целей достаточно сложны и громоздки. Изучение возможности создания простой и компактной конструкции импульсного ускорителя привело нас к выводу, что при некоторых усовершенствованиях и при использовании существующих в настоящее время технических средств весьма перспективной является схема ускорения с помощью трансформатора с ударным возбуждением (трансформатора Тесла) /4/. Ускорители на основе таких трансформаторов строились еще в 30-х годах /5,6/, однако из-за ряда недостатков - немонохроматичности пучка, низкого к.п.д. и др. - с появлением других методов ускорения работы по их усовершенствованию, практически, были прекращены.

Ниже изложены результаты исследования указанного способа ускорения, проведенные в Институте ядерной физики СО АН СССР в течение 1965 года.

Принцип работы и схема ускорителя.

Упрощенная схема трансформатора Тесла, нагруженного на ускорительную трубку, показана на рис.1. L_1 и L_2 - индуктивности первичной и вторичной обмоток, C_1 - ёмкость в цепи первичной обмотки, C_2 - распределенная ёмкость вторичной обмотки, 1 - устройство для зарядки конденсатора C_1 , 2 - коммутирующее устройство (условно показано в виде ключа), 3 - ускорительная трубка, 4 - катод инжектора и 5 - управляющая сетка. Величина C_1 подбирается так, чтобы обеспечить $C_1 L_1 = C_2 L_2$. При замыкании коммутатора 2 начинаются колебания в связанных контурах. Через некоторое время, зависящее от коэффициента связи обмоток, напряжение на вторичной обмотке достигает максимума, а энергия, запасённая до начала цикла в ёмкости C_1 , оказывается сосредоточенной в ёмкости вторичной обмотки - C_2 .

Основными особенностями электрической схемы описываемого ускорителя являются высокий коэффициент связи обмоток трансформатора и наличие управления током инжектора. Остановимся на этом подробнее.

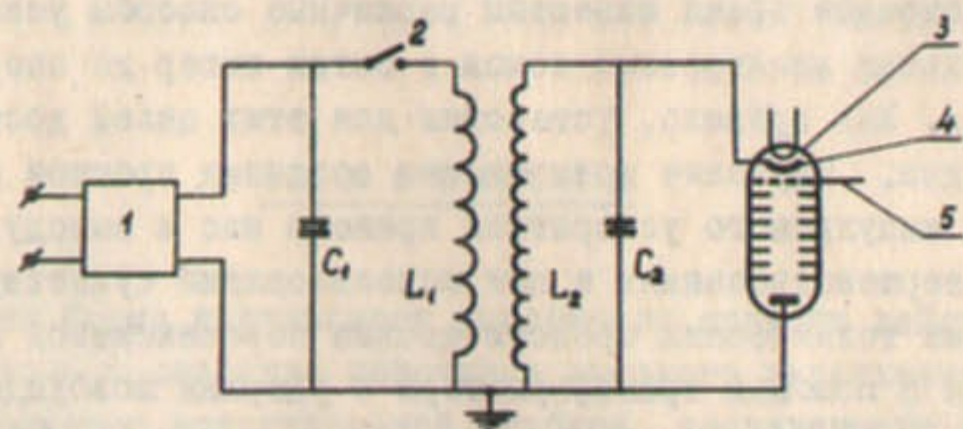


Рис. 1. Электрическая схема ускорителя.

1 - устройство для зарядки конденсатора в первичной цепи; 2 - коммутирующее устройство; 3 - ускорительная трубка; 4 - катод инжектора; 5 - управляющая сетка инжектора; L_1 - индуктивность первичной цепи; L_2 - индуктивность вторичной цепи; C_1 - конденсатор в цепи первичной обмотки; C_2 - распределенная ёмкость вторичной обмотки.

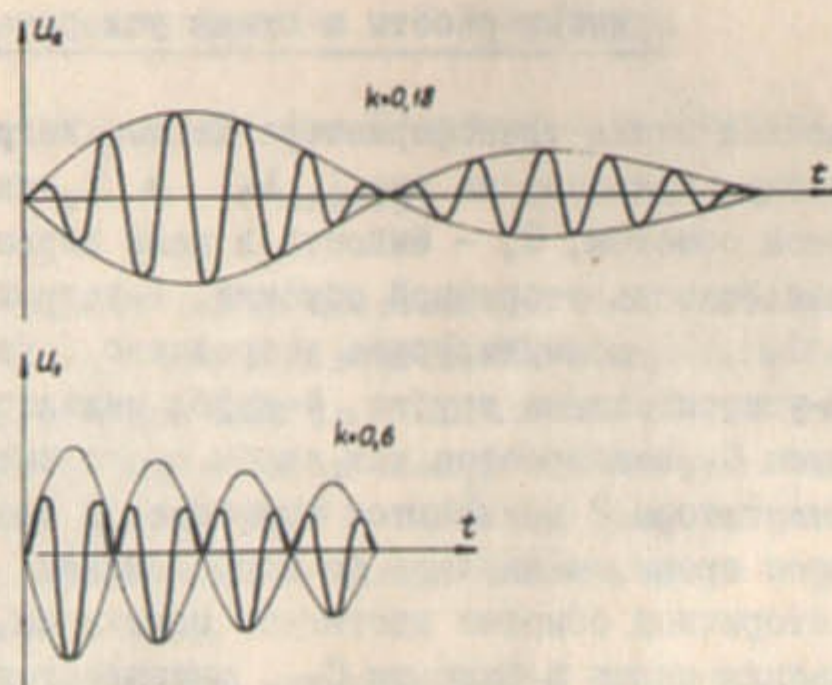


Рис. 2. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора при различных коэффициентах связи.

Как известно, (см., например, /7/), напряжение U_2 на вторичной обмотке трансформатора Тесла меняется по закону

$$U_2 = U_{01} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} e^{-t/\rho} \sin \frac{\omega}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1-k}} + \frac{1}{\sqrt{1+k}} \right) t \sin \frac{\omega}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1-k}} - \frac{1}{\sqrt{1+k}} \right) t$$

где U_{01} - напряжение на конденсаторе C_1 в момент включения коммутатора, ω - собственная частота каждого из контуров, k - коэффициент связи, ρ - постоянная времени затухания колебаний. Из приведенной формулы следует, что максимальное значение вторичного напряжения достигается при некоторых фиксированных значениях k (0,6; 0,885; 0,28; 0,222; 0,18 и т.д.).

На рис.2 показаны кривые изменения U_2 на холостом ходу (ток через трубку отсутствует) для $k=0,18$ и для $k=0,6$. Как видно из рисунка, при коэффициенте связи $k=0,6$ напряжение на вторичной обмотке достигает максимума уже в течение первого периода колебаний. Достижение такого коэффициента связи вполне реально при использовании качественной изоляции между первичной и вторичной обмотками и рациональном решении конструкции трансформатора. Повышение связи обмоток в трансформаторе с ударным возбуждением уменьшает омические потери энергии за цикл и, соответственно, улучшает тепловой режим обмоток. Например, при добротности системы $Q=80$ энергия, сосредоточенная в ёмкости вторичной обмотки в момент первого максимума U_2 , для $k=0,18$

составляет $\frac{C_2 U_2^2}{2} = 0,55 \frac{C_1 U_1^2}{2}$ и для $k=0,6$ - $\frac{C_2 U_2^2}{2} = 0,86 \frac{C_1 U_1^2}{2}$. Максимальное напряжение на вторичной обмотке в первом случае $U_{2m} = 0,75 U_{01} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$ и во втором случае $U_{2m} = 0,98 U_{01} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$

Не менее существенным для улучшения работы ускорителя является отсутствие тока через трубку до того момента, пока напряжение на вторичной обмотке не достигнет заданного значения. Это обеспечивается тем, что инжектор всё время заперт и открывается сигналом на управляющую сетку 5 только на время τ . Возможны несколько режимов работы установки, показанные на рис.3. В случае a сетка открывается на малое

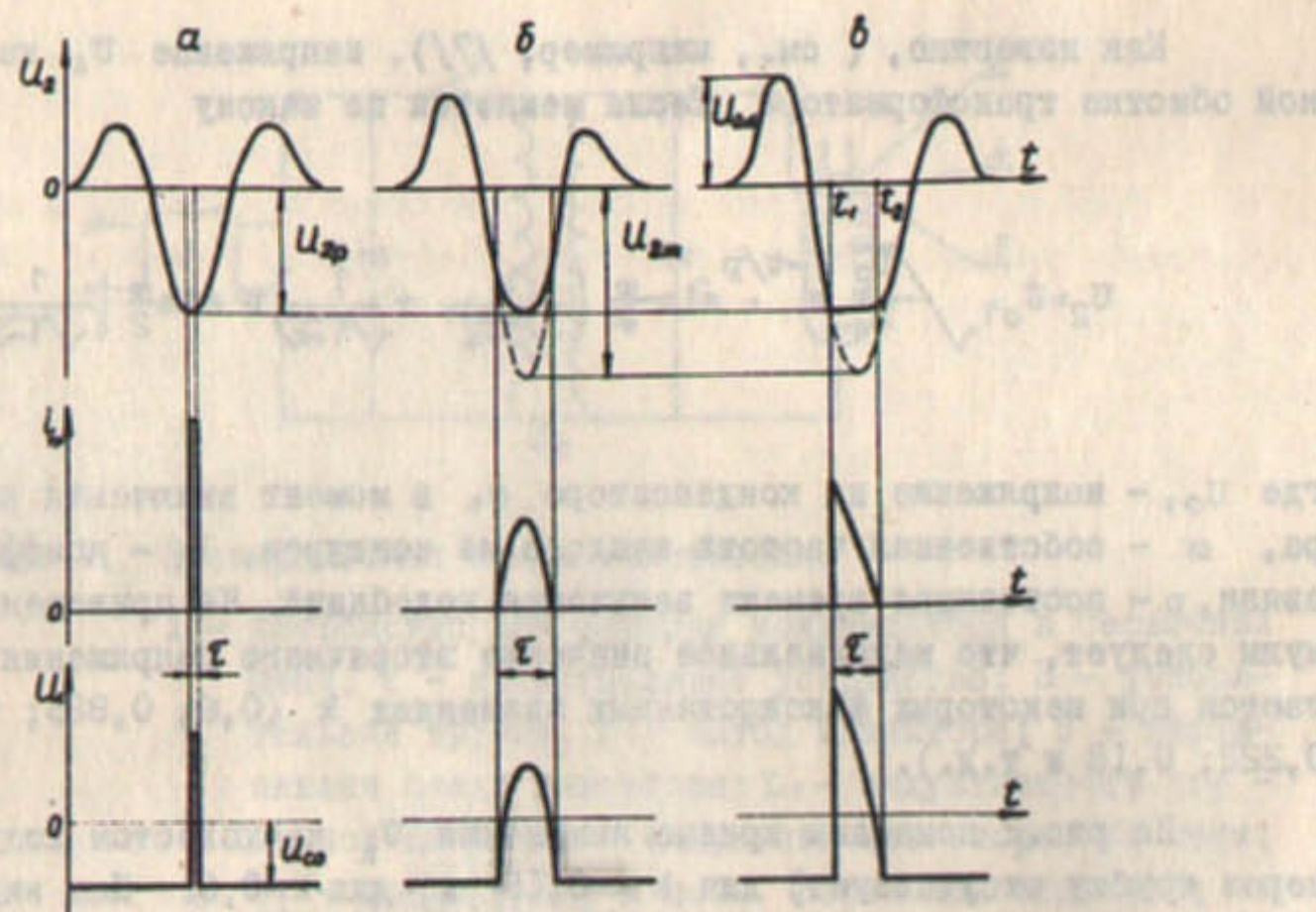


Рис. 3. Различные режимы работы ускорителя.
 U_2 - напряжение на вторичной обмотке; $i_{тр}$ - ток ускоренных электронов; U_0 - напряжение на сетке инжектора;
 U_{2p} - максимальное ускоряющее напряжение при наличии тока в трубке; U_{2m} - максимальное напряжение на вторичной обмотке на холостом ходу; U_{2ob} - максимальное обратное напряжение; U_{co} - напряжение на управляющей сетке полностью запирающее ток инжектора; τ - длительность импульса тока в трубке.

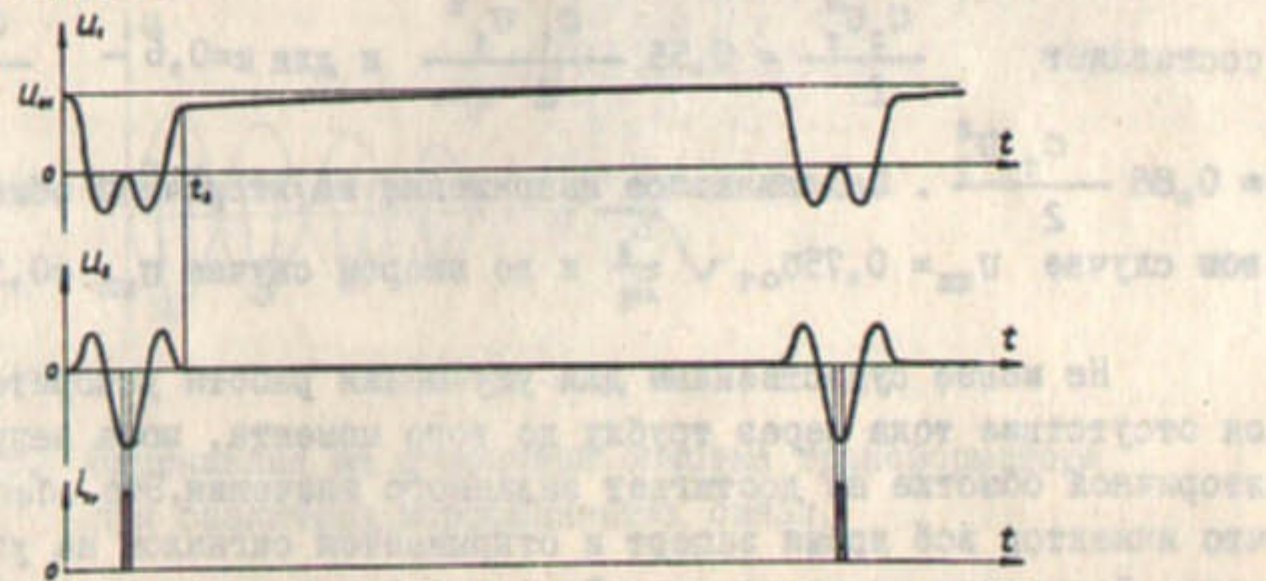


Рис. 4. Режим ускорения с рекуперацией энергии.
 U_1 - напряжение на первичной обмотке; U_2 - напряжение на вторичной обмотке; $i_{тр}$ - ток ускоренных электронов; U_{01} - начальное напряжение на конденсаторе первичного контура.

время ζ , величина тока через трубку $i_{тр}$ задаётся допустимым изменением ускоряющего напряжения за время импульса ΔU_2 , т.е.

$$i_{тр} = \frac{C_2 \Delta U_2}{\tau}$$

В режиме б управляющая сетка открывается на промежуток времени, составляющий до $\frac{1}{3}$ периода собственных колебаний вторичного контура $\tau \leq \frac{1}{3} \frac{2\pi}{\omega}$. Такой режим может осуществляться, если допускается некогерентность энергии частиц 5-10% и более. Наконец, меняя ток в трубке по определенной программе, можно обеспечить широкий импульс тока ускоренных частиц с постоянной энергией - случай в. Закон изменения тока в трубке, обеспечивающий постоянное ускоряющее напряжение на ней, может быть легко найден решением системы уравнений для двух связанных контуров $U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$ и $U_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$ для времени $t > t_1$ при заданном постоянном значении напряжения на трубке $U_2 = const$. При этом $i_{тр} = i_2$, так как электрическая энергия в ёмкости C_2 не меняется.

Для оценки уносимой пучком энергии рассмотрим два случая:

I $U_{2p} = 0,7U_{2m}$ и II $U_{2p} = 0,5U_{2m}$, где U_{2m} - напряжение на вторичной обмотке на холостом ходу. Величины ускоряющих напряжений U_{2p} примем одинаковыми для обоих случаев. Обратное напряжение U_{2ob} в обоих случаях не превышает по абсолютной величине U_{2p} . Зависимость спада тока в трубке во времени для таких режимов близка к линейной; энергия, уносимая пучком, в случае I -

$$U_{2p} \int_{t_1}^{t_2} i_{тр} dt \approx \frac{C_2 U_{2p}}{2}$$
, в случае II - $U_{2p} \int_{t_1}^{t_2} i_{тр} dt \approx 3 \frac{C_2 U_{2p}}{2}$

Режим в, особенно в случае $U_{2p} = 0,5 U_{2m}$, позволяет уносить в пучке максимальную, по сравнению с другими режимами, энергию (джоули) в каждом цикле, сохраняя энергию (эВ) электронов постоянной.

Для улучшения кпд рассматриваемого ускорителя, особенно для случая а (рис.3), может быть осуществлена рекуперация энергии, оставшейся во вторичном контуре после прохождения импульса тока. В момент t_2 (рис.4) вся энергия, оставшаяся в контуре после прохождения пучка, сосредотачивается в ёмкости первичного контура C_1 , и ток в первичной цепи равен нулю. Если с помощью коммутирующего устройства 2 (рис.1) разомкнуть в этот момент цепь первичной обмотки, то колебания прекратятся, и после подзарядки ёмкости C_1 до напряжения U_{01}

система снова будет в исходном положении. Таким образом, теряется только энергия, затраченная на джоулево тепло за время цикла. Возможность осуществления режима работы с рекуперацией энергии определяется, в основном, наличием коммутатора, способного размыкать цепь за время, существенно меньшее периода колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Конструкция установки

На рис. 5 показан разрез экспериментального ускорителя ЭЛИТ-1¹⁾, имеющего следующие расчётные параметры:

- энергия ускоренных частиц - 1 мэв ;
- импульсный ток в режиме а (рис. 3)..... -100 а ;
- энергия, уносимая пучком за 1 импульс в режимах б и в до 150 дж ;
- частота повторения - 50 гц и выше ;
- габариты котла, в который помещена установка:
 - диаметр -900 мм ;
 - высота -700 мм ;
- ёмкость первичного контура $C_1 = 0,13$ мкф ;
- ёмкость вторичного контура $C_2 = 130$ пф ;
- индуктивность первичного контура $L_1 = 24$ мкгн ;
- индуктивность вторичного контура $L_2 = 0,019$ гн ;
- собственные частоты первичного и вторичного контуров..... - 90 кгц ;
- коэффициент связи обмоток..... $k = 0,6$.

Как видно из рис. 5, первичная обмотка 2 и вторичная обмотка 3 расположены коаксиально. Первичная обмотка состоит из четырех витков, намотанных на медный экран 13, являющийся пятым витком. Применение экрана 13 позволяет уменьшить потоки рассеяния первичной обмотки и улучшает индуктивную связь обмоток. Вторичная обмотка заканчивается с высоковольтной стороны потенциальным электродом 6, прозрачным для магнитного потока. Магнитный поток проходит по яриам I, выполненным из электротехнической стали толщиной 0,05 мм, применение которых, в принципе, не обязательно, однако позволяет не сколько уменьшить габариты котла 4.

1) ЭЛИТ - электронный импульсный трансформатор.

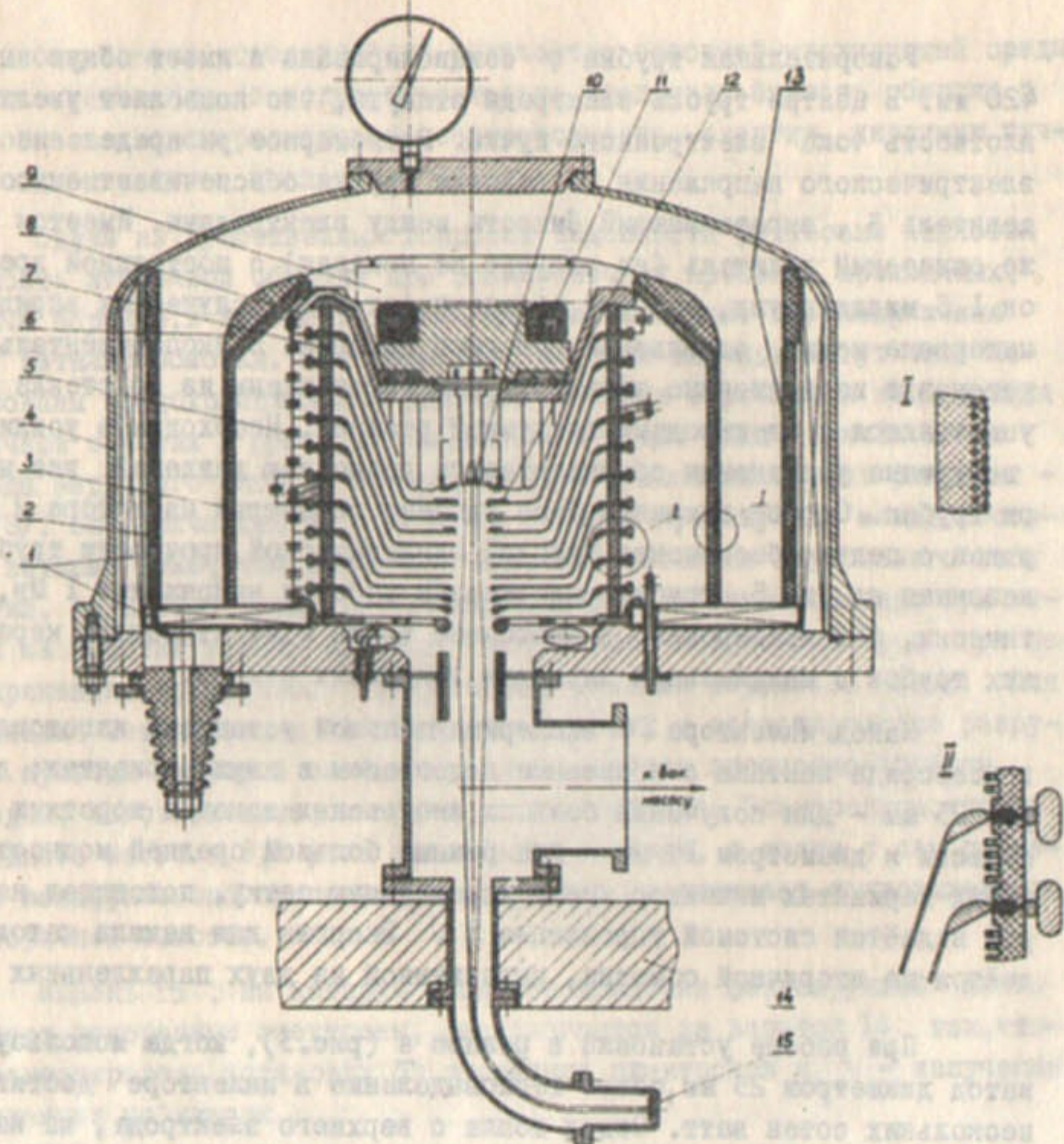


Рис. 5. Схема конструкции установки ЭЛИТ-1.

- 1 - яриа магнитопровода; 2 - первичная обмотка трансформатора;
- 3 - вторичная обмотка; 4 - котел; 5 - емкостной делитель;
- 6 - потенциальный электрод; 7 - ускорительная трубка;
- 8 - трубка масляного охлаждения; 9 - система управления;
- 10 - катод инжектора; 11 - трансформатор на высоковольтном электроде трубки; 12 - тепловые экраны; 13 - медный экран первичной обмотки; 14 - радиационная защита;
- 15 - мишень.

Ускорительная трубка 7 секционирована и имеет общую высоту 420 мм. В центре трубки электроды стянуты, что позволяет увеличить плотность тока электронного пучка. Равномерное распределение электрического напряжения по секциям трубки обеспечивает емкостной делитель 5, выравнивающий ёмкости между электродами. Имеется также омический делитель (на рисунке не показан) с постоянной времени ок. 1,5 микросекунд, который обеспечивает отвод случайных зарядов в интервале между отдельными рабочими циклами. В экспериментальной установке изоляционные кольца трубки изготовлены из оргстекла и уплотняются с электродами вакуумной резиной. Необходимое усилие на вакуумные уплотнения обеспечивается разностью давлений вне и внутри трубки. Особое внимание было уделено геометрии изолятора и электродов с целью обеспечения высокой электрической прочности трубки. Показанная на рис. 5 трубка выдерживала рабочее напряжение 1 Мв, практически, без тренировки. В настоящее время идёт отработка керамических трубок с минимальной площадью вакуумных стыков.

Катод инжектора 10 экспериментальной установки изготовлен из гексаборида лантана с косвенным подогревом в двух вариантах: диаметром 25 мм — для получения больших импульсных токов в коротких импульсах и диаметром 14 мм — для режима большой средней мощности. В обоих вариантах инжектор имеет управляющую сетку, потенциал на которой задаётся системой управления 9. Энергия для накала катода подаётся по вторичной обмотке, выполненной из двух параллельных слоёв.

При работе установки в режиме а (рис. 3), когда используется катод диаметром 25 мм, общее тепловыделение в инжекторе достигает нескольких сотен ватт. Отвод тепла с верхнего электрода, на котором укреплен инжектор, осуществляется маслом, которое циркулирует по винипластовой спирали 8. Для уменьшения теплового потока на изолятор трубки имеются экраны 12, а в конусной части электродов-окна, которые одновременно облегчают вакуумную откачку трубки. Впоследствии предполагается перейти к пропитанным или оксидным катодам, что вместе с применением керамических изоляторов существенно облегчит тепловой режим трубки.

Котел установки заполняется смесью газа из равных объёмов фреона-12 и азота общим давлением 8 атмосфер. Перед подачей газа для просушки системы трансформатор несколько часов выдерживается под вакуумом. Газ перед подачей в котел также проходит через сушилку. Изучается

также возможность использования в качестве основной изолирующей среды в котле масла. Это позволит существенно увеличить ёмкость обмотки в установке заданных размеров и, соответственно, энергию, уносимую пучком в одном рабочем цикле.

Одним из существенных вопросов надёжности установки является стойкость вторичной обмотки при тренировочных пробоях, проходящих, главным образом, в трубке и вызывающих значительные перенапряжения между витками обмотки. Как известно, в таких случаях могут быть использованы предохранительные разрядники. Нами опробована конструкция вторичной обмотки 3 (рис. 5, I), намотанной в два слоя, причём витки провода наружного слоя не имеют изоляции и выполняют роль разрядников /8/. Электрическая прочность по газовым промежуткам между соседними витками ниже, чем прочность витковой изоляции внутреннего слоя обмотки, но в тоже время достаточна для обеспечения изоляции при наличии на обмотке только рабочего напряжения. Вследствие этого при перенапряжениях пробиваются зазоры между витками наружного слоя. Для устранения металлизации изоляции при пробоях и предотвращения разрушения провода наружный слой может быть намотан эрозионно-стойким проводом, изготовленным, например, из вольфрама. Электропроводность последнего всего в 3,5 раза отличается от меди, в связи с чем применение вольфрамового провода несущественно увеличивает тепловыделение во вторичной обмотке.

Мишень 15, на которую после прохождения фокусирующей линзы попадают ускоренные электроны, располагается за защитой 14 так, чтобы заэкранировать установку от вторичных электронов и γ -излучения, возникающих на мишени.

Система управления и электропитания.

Одним из основных элементов, определяющих работу ускорителя, является коммутатор 2 (рис. I) в первичной цепи. В описываемой установке он должен пропускать ток 3,5 ка при начальном напряжении на конденсаторе C_1 $U_{01} = 45$ кв (данные для режима v_1 $U_{2p} = 0,7 U_{2m}$). Частота повторения также, практически, определяется возможностями коммутатора, потери в трансформаторе за один рабочий цикл составляют в этом случае ок. 15 джоулей и тепло, выделяемое в трансформаторе, может быть снято даже при частоте повторения рабочего цикла в сотни герц. На экспериментальной установке в качестве коммутатора исполь-

зуются импульсные тиратроны, включенные встречно-параллельно. Могут быть применены также разрядники с поджигающим электродом типа описанных в /9/ и другие коммутаторы. Для осуществления схемы с рекуперацией энергии необходимо использовать коммутаторы с малым временем восстановления электрической прочности или применять специальные схемы, облегчающие запирающие коммутатора /10/.

В некоторых случаях может быть использована схема, позволяющая работать на менее мощных коммутаторах, включающих q параллельных первичных обмоток (рис.6). Тогда собственная частота каждого первичного контура равна частоте вторичного контура $L_q C_q = L_2 C_2$, суммарный магнитный поток $\Phi = q L_q i_q \frac{1}{w_q}$ и запасенная в q первичных контурах энергия составляет $\frac{1}{2} q C_q U_{0q}^2$. Отсюда можно видеть, каковы параметры каждого из q коммутаторов по сравнению со случаем единой первичной обмотки: $q^2 \frac{w_q^2}{w_1^2} \frac{i_q^2}{i_1^2} \frac{U_{0q}^2}{U_{01}^2} = 1$

Здесь i_1 и U_{01} — максимальные ток и напряжения, на которые должен быть рассчитан коммутатор в случае единой первичной обмотки, имеющей w_1 витков, i_q , U_{0q} , w_q — соответствующие величины для каждого из q параллельных контуров. Так, для случая $q = 10$ и $w_q = w_1$, имеем $\frac{i_q}{i_1} \frac{U_{0q}^2}{U_{01}^2} = \frac{1}{100}$. Можно выбрать, например, $i_q = \frac{1}{10} i_1$ и $U_{0q} \cong \frac{1}{5} U_{01}$ для каждого из десяти коммутаторов. Синхронизация коммутаторов допускается с точностью порядка 0,1 микросекунды.

Как уже говорилось, электропитание на высоковольтную часть ускорительной трубки подается по двухслойной вторичной обмотке. Затем напряжение преобразуется с помощью трансформатора II /рис.5/ и подается на накал инжектора и систему управления 9. Последняя задаёт напряжение на управляющей сетке инжектора. Схема управления сеточным напряжением приведена на рис.7а. Напряжение на сетке U_c (рис.7б) складывается из напряжений смещения $U_{см}$ и отпирающего напряжения U_T , формируемого генератором импульсов ГИ. Напряжение смещения есть сумма переменного напряжения низкой частоты (50 или 400 гц) и напряжения на конденсаторе C , которое благодаря односторонней проводимости системы катод-сетка получается равным амплитудному значению переменного напряжения. В результате на сетке действует пульсирующее отрицательное напряжение, на которое накладывается положительный импульс U_T . Суммарное напряжение на сетке может меняться благодаря синхронизации момента включения коммутатора 2 (рис.1)

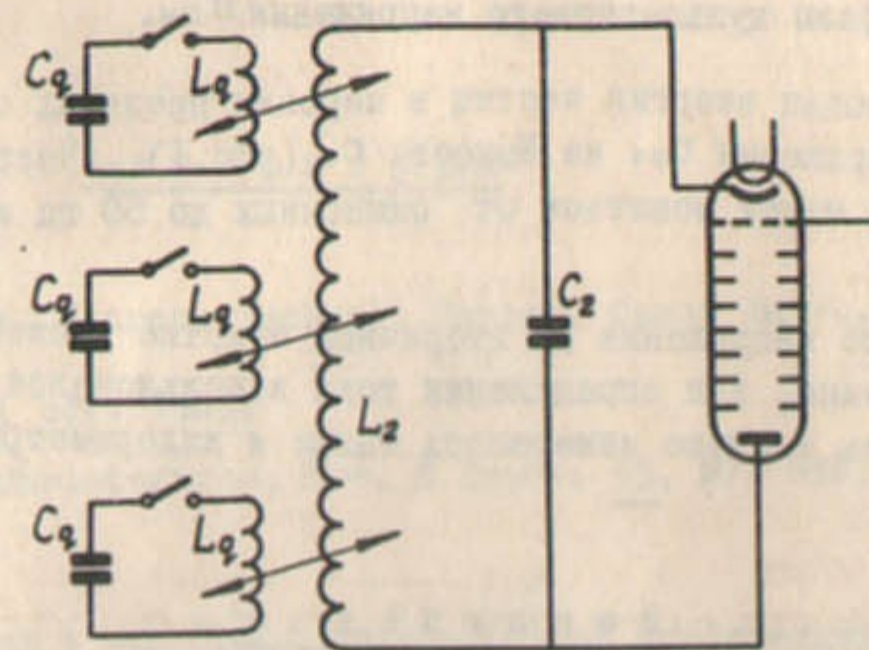


Рис. 6. Трансформатор с несколькими параллельными первичными контурами.

C_q — ёмкость в каждом первичном контуре; L_q — индуктивность каждого первичного контура; C_2 — распределённая ёмкость вторичной обмотки; L_2 — индуктивность вторичной цепи.

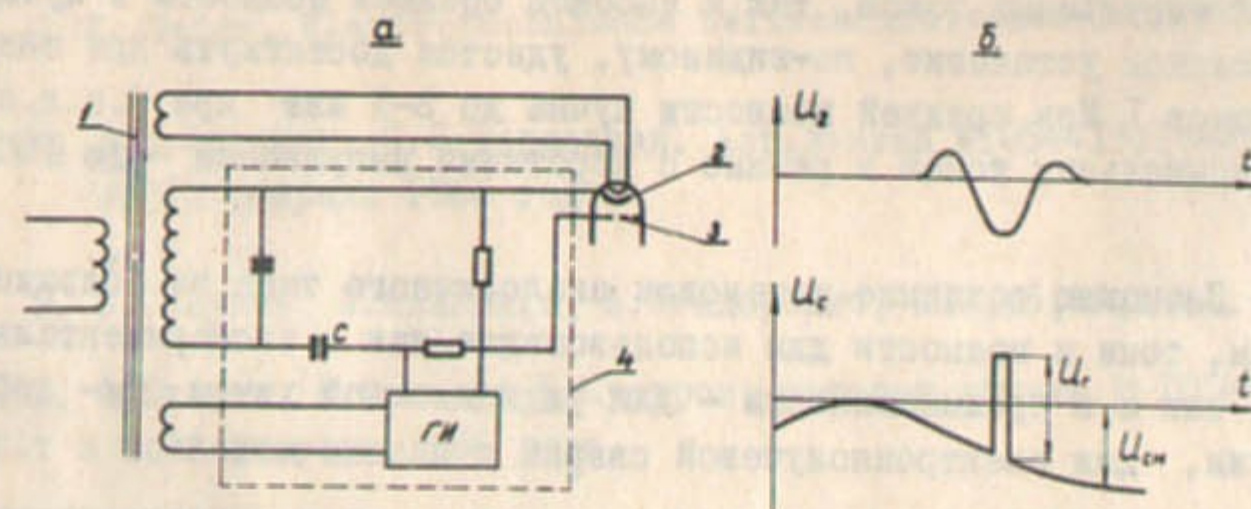


Рис. 7. Схема управления напряжением на сетке инжектора.

1 — трансформатор на высоковольтном электроде трубки; 2 — катод инжектора; 3 — управляющая сетка инжектора; 4 — система управления; ГИ — генератор импульсов U_2 — напряжение на вторичной обмотке; U_c — напряжение на сетке инжектора; $U_{см}$ — напряжение смещения на сетке; U_T — импульс отпирающего напряжения.

относительно фазы пульсирующего напряжения U см.

Регулировка энергии частиц в широких пределах осуществляется изменением напряжения U_0 на ёмкости C_1 (рис.1). Частота следования рабочих циклов может меняться от одиночных до 50 гц и выше.

Измерение напряжения на вторичной обмотке производится с помощью ёмкостного датчика, для определения тока использовался цилиндр Фарадея. Средняя мощность в пучке измерялась также и калориметрическим методом.

З а к л ю ч е н и е

К настоящему времени проведена начальная отладка установки ЭЛИТ-1, получены токи до 35 ампер при энергии 1 Мэв, длительности импульсов 2 мксек, частоте повторения 10 гц в режиме без стабилизации энергии (рис.3б). Средняя мощность составила ок.0,7 квт, кпд-ок.50% (без рекуперации).

Проведенные расчёты и эксперименты показали, что ускорители такого типа могут быть с успехом использованы для получения как больших импульсных токов, так и высокой средней мощности в пучке. На описанной установке, по-видимому, удастся достигнуть при энергии электронов 1 Мэв средней мощности пучка до 3-5 квт при к.п.д.свыше 50%, максимальных токов в режиме с короткими импульсами - до 100 ампер.

Возможно создание установок аналогичного типа на бoльшие энергии, токи и мощности для использования как в экспериментальных целях, так и в промышленности - для радиационной химии, γ -дефектоскопии, для электроннолучевой сварки и плавки металлов и т.п.

В заключение считаем своим приятным долгом поблагодарить сотрудников института, принявших участие в работе - В.Гапонова и Г.Крайнова - на начальной стадии проектирования установки, С.Воропаева и В.Долгушина, конструировавших ускоритель, В.Панасюка и А.Егорова, разработавших системы управления и питания, Г.Балыкова, создавшего инжекторы, В.Бирюкова, М.Воронова, М.Губина, Ю.Ефременкова, А.Косачёва и Б.Шкляева - за участие в изготовлении и наладке ускорителя и В.Кирова, А.Фоминского и А.Качалову - участвовавших в проектировании.

Л и т е р а т у р а

1. M.Okada, J.Arata, Technol. Report, Osaka Univ., 13, 289-296 (oct. 1963)
2. N. C. Christofilos, Rev. S.Instr. 35, N7, 886, 1964.
3. Ю.А.Гриц и др. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963 г., стр.1080.
4. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.А.Гапонов, Г.С.Крайнов. Авт.заявка № 1025550/26-25 от 24 июля 1965 года.
5. G Breit, M.A.Tuve, O. Dahl, Physical Rev., 35, 51, 1930.
6. А.К.Вальтер, Атака атомного ядра, 1933г.
7. W. Heise, Elektrotechnische Zeitschrift, серия А-1, 1964.
8. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман. Авт.заявка №1054413/26-25 от 18 февраля 1966 года.
9. С.Смирнов, Л.Махненко, А.Шендерович, ПТЭ, №3, 89, 1961.
10. А.Егоров, В.Панасюк, Н.Шустров, авторск.заявка № 1054402/26-9 от 18 февраля 1966 года.