

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

БР 116
468

Препринт

Е.А.Абрамкин, В.А.Гапонов

СИДНОТОЧНЫЙ УСКОИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРА

г.Новосибирск

1966

БР $\frac{115}{468}$

препринт 19

Е.А.Абрамян, В.А.Галопов

**Сильноточный ускоритель на основе
трансформатора**

НОВОСИБИРСК 1966

А н н о т а ц и я

Описан принцип работы ускорителя прямого действия, предназначенного для ускорения электронов до энергии 1,5 Мэв при средней мощности пучка десятки микроватт и кдд около 90%. Ускоритель представляет собой трансформатор с сердечником, состоящим из изолированных секций, со встроенной ускорительной трубкой, работающий от сети 50 гц и помещенный в среду сжатого газа. Постоянство энергии электронов обеспечивается стабилизацией напряжения на трубке с помощью регулирования тока в трубке. Длительность импульсов электронного тока регулируется от 0 до 5 нсек, частота повторения до 50 раз в секунду. Средний ток i_{cp} может достигать 1/6 величины максимального тока в импульсе. Для проведения по ускорительной трубке электронного тока до 100 ма в пучке диаметром несколько миллиметров внутри трубки установлены магнитные линзы. Защиту газовых заворов и других электрически напряженных участков ускорителя от радиации, возникающей внутри трубки, обеспечивают экраны из тяжелого металла, расположенные вблизи оси трубки.

Описана конструкция установки, на которой получен пучок электронов с энергией 1,5 Мэв и средней мощностью 25 мвт (i_{cp} ок. 17 ма).



-3522

Б.Абрамжан, В.Гапонов.

Transformer Type High-Current Accelerator.

Summary

A principle of operation of accelerator designed for acceleration of electrons up to 1,5 Mev with average beam power of several tens kw and efficiency 90% is described.

The accelerator is an insulating-core transformer with mounted beam tube operated in atmosphere of insulating pressurized gas. A-c power frequency is 50 cps.

Energy of electrons is constant because of stabilization of the accelerating voltage due to beam current variations. Current pulse length time is varied in 0 - 5 nsec. repetition rate - up to 50 cps. The average beam current i_{av} may be 1/6 of maximal pulse current. For transportation of a beam with electron current up to 100 ma with a beam diameter of several mm magnetic lenses are installed inside beam tube. For radiative protection of insulating gaps and other electrically dangerous details near beam axis high - Z materials shields are mounted.

The design of machine is described on which the electron beam at 1,5 Mev and beam power of 25 kilowatts was achieved.

Ускорители электронов на энергии 1 Мэв и выше могут быть широко использованы как для физических исследований, так и для различных прикладных целей. Известны применения ускорителей как источников радиации для процессов радиационной химии, для стерилизации медикаментов, консервирования продуктов и других технологических процессов, основанных на использовании излучения. Электронные пучки с плотностью энергии в десятки киловатт на $см^2$ позволяют вести плавку, сварку и другую обработку металлов. При энергии во многие сотни киловольт электроны могут быть вылучены из вакуумного объема, где происходит ускорение, и использованы в воздухе или в среде инертного газа при атмосферном или более высоком давлении.

В конце 1963 года по инициативе Г.И.Будкера в Институте ядерной физики СО АН СССР были начаты поисковые работы по созданию ускорителя для прикладных целей с большой мощностью в пучке и высоким кнд. Среди многих известных и возможных способов ускорения заряженных частиц была выбрана схема ускорения с помощью трансформатора/1/. В 1964 году была сконструирована и изготовлена первая экспериментальная установка ЗТ-1,5 - электронный трансформатор для ускорения электронов до энергии 1,5 Мэв. Ниже описывается принцип работы и основные элементы конструкции установки.

1. Схема установки

Принципиальная конструктивная схема установки показана на рис.1. Первичная обмотка трансформатора 1 и секции 2 вторичной обмотки расположены коаксиально. Центральная часть магнитопровода состоит из отдельных изолированных друг от друга дисков 3 и оканчивается с высоковольтной стороны головкой 4. Магнитный поток проходит также по наружным деталям магнитопровода 5, 6, 14 и по основанию магнитопровода 16. Секции 2 соединены последовательно, каждая две секции закреплены на диске 3, и средняя точка пары секций электрически соединена с диском. Ускорительная трубка 8 встроена в трансформатор и для равновесия напряжения на ней контактирует с дисками 3. Инжектор 10 имеет управляющий электрод 9, который позволяет регулировать величину электронного тока через трубку вплоть до полного запаривания. Накал катода и напряжение на управляющем электроде обеспечивает система

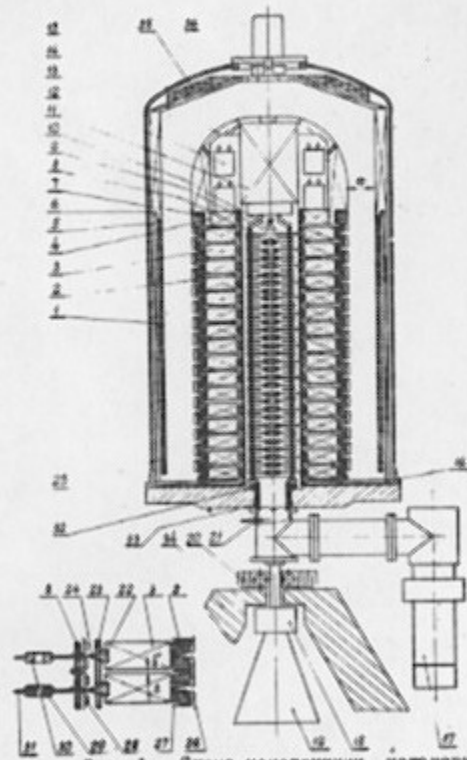


Рис. 1. Схема конструкции установки:

1-первичная обмотка трансформатора; 2-секция вторичной обмотки; 3-диск магнитопровода; 4-високовольтная часть магнитопровода (голова); 5, 6, 14-детали магнитопровода; 7-катушка головы; 8-ускорительная трубка; 9-управляющий электрод; 10-инжектор; 11-система питания инжектора; 12-конденсаторная батарея; 13-емкостной датчик головы; 15-котел; 16-основание магнитопровода; 17-вакуумный насос; 18-разворачивающий магнит; 19-раструб с выпускным окном; 20-полюс Роговского; 21-пробки; 22-медные кольца; 23-опорные цилиндры; 24-упругие контакты ускорительной трубки; 25-экран первичной обмотки; 26-экраны секций вторичной обмотки; 27-предохранительные разрядники; 28-омический делитель; 29-магнитные линзы; 30-радиационные экраны; 31-электроды ускорительной трубки; 32-шаровая опора трубки; 33-уплотнение трубки; 34-радиационная защита.

4

питания инжектора II, которая питается от катушки 7, являющейся частью вторичной обмотки. Датчиком схемы регулирования напряжения на электроде 9 является емкостной делитель 13. В голове 4, помимо системы управления, размещена батарея конденсаторов 12, подсоединенная к катушке 7. Назначение конденсаторов 12 будет пояснено ниже. Весь трансформатор помещен в котел 15, заполненный сухим газом. Вакуумный насос 17 обеспечивает в трубке вакуум $10^{-5} - 10^{-6}$ мм рт.ст. Для развертки пучка и выпуска электронов в атмосферу имеются магнит 18 и раструб с фольгой 19. Размеры и положение пучка определяются пробками 21, величина тока - экранированным полюсом Роговского 20.

2. Принцип работы и особенности трансформатора.

На рис.2 показана эквивалентная схема трансформатора. L - индуктивность трансформатора, L_{12} - индуктивность рассеяния первичной обмотки, C - общая емкость трансформатора, R_H - сопротивление нагрузки. Будем рассматривать случай, когда мощность, термая в трансформаторе, много меньше мощности в полезной нагрузке. Примем также, что собственная частота контура LC равна частоте изменения напряжения u_1 , подаваемого на первичную обмотку. Как уже указывалось, благодаря наличию у инжектора управляющего электрода, ток через трубку может быть равен нулю даже в те полупериоды, когда полярность напряжения на вторичной обмотке соответствует ускорению электронов (мину на високовольтном конце трубки). Пока ток в трубке отсутствует, трансформатор работает в режиме холостого хода, и ток в первичной обмотке i_1 мал. Предположим, что управляющий электрод начинает открываться с момента t_1 (рис.3). Легко видеть, что при определенном законе изменения тока в ускорительной трубке i_{TP} напряжение на трубке u_{TP} может оставаться постоянным. Обозначая w_1 и w_2 число витков в первичной и вторичной обмотках и $K = \frac{w_1}{w_2}$ коэффициент трансформации, для интервала времени $t_1 < t < t_2$ можно записать $u_{12} \sin \omega t = L_{12} \frac{di_1}{dt} + K i_{TP}$. Интегрируя обе части уравнения, полагая $u_{TP} = \text{const}$ и учитывая, что $\frac{u_{12}}{K} = u_{12}$, получим

$$i_1 = u_{TP} \frac{K}{L_{12}} \left[\frac{u_{12}}{\omega u_{TP}} (\text{const}_1 - \text{const}_2) - (t - t_1) \right]. \quad (1)$$

5

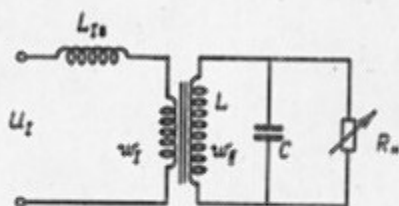


Рис. 2. Упрощенная схема трансформатора:
 L - индуктивность трансформатора;
 L_{1a} - индуктивность рассеяния первичной обмотки;
 C - ёмкость трансформатора;
 R_n - сопротивление нагрузки.

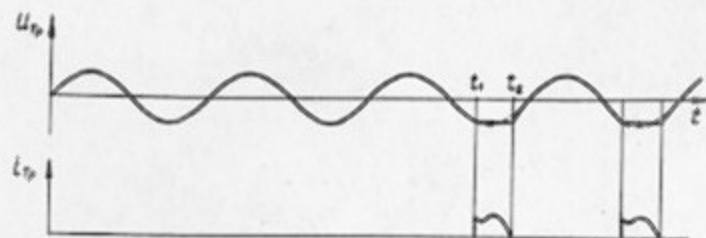


Рис. 3. Графики изменения напряжения и тока трубки:
 U_{tr} - напряжение на ускоряющей трубке;
 i_{tr} - ток ускоренных электронов.

В течение времени $t_1 < t < t_2$ напряжение на индуктивности L также постоянно $L \cdot di_L/dt = u_{tr}$, откуда ток в индуктивности $i_L = \frac{u_{tr}}{L} (t - t_1) + i_L(t_1)$. $i_L(t_1)$ находим из режима холостого хода:

$$L \frac{di_L}{dt} = u_{na} \sin \omega t \quad \text{и} \quad i_L(t_1) = -\frac{u_{na}}{\omega L} \cos \omega t_1.$$

При постоянном напряжении на ёмкости C ток $i_C = 0$ и ток в трубке $i_{tr} = k i_1 - i_L$. Обозначая $\frac{u_{tr}}{u_{na}} = \sin \omega t_1 = \alpha$ и $\frac{L i_{tr}}{u_{na}} = \nu$ получим

$$i_{tr} = \frac{u_{na}}{\omega L_{1a}} \left[(k^2 + \nu) \cos \omega t_1 - \omega (k^2 + \nu) (t - t_1) - k^2 \cos \omega t \right]. \quad (2)$$

Момент времени t_2 может быть найден из условия $i_{tr} = 0$ из трансцендентного уравнения

$$(k^2 + \nu) \cos \omega t_1 - \omega (k^2 + \nu) (t_2 - t_1) - k^2 \cos \omega t_2 = 0. \quad (3)$$

Средняя мощность в пучке $P_{\text{полезн}} = f u_{tr} \int_{t_1}^{t_2} i_{tr} dt$ или

$$P_{\text{полезн}} = \frac{u_{tr}^2}{2\omega L_{1a}} \left[(k^2 + \nu) (t_2 - t_1) \cos \omega t_1 - \frac{\omega}{2} (k^2 + \nu) (t_2 - t_1)^2 - \frac{k^2}{\omega} (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1) \right]. \quad (4)$$

Полученная формула для $P_{\text{полезн}}$ является приближенной и отражает качественную зависимость полезной мощности от длительности импульса $t_2 - t_1$, индуктивности рассеяния L_{1a} и соотношения $\nu = \frac{L i_{tr}}{u_{na}}$. Более точная зависимость величины полезной мощности от всех параметров в установленном режиме с учетом распределенных параметров трансформатора

изучалась на моделях. Для описываемой ниже установки $R_{\text{полн.}} = 25 \text{ к}\Omega$ при $t_2 - t_1 = 5 \text{ мсек}$, $L_{12} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ гн}$, $L = 40000 \text{ гн}$ и $\nu = 1,15 \cdot 10^{-8}$.

Описанный способ поддержания постоянного напряжения на трубке с помощью регулирования тока в трубке может быть использован, естественно, для получения и другой формы $i_{\text{тр}}(t)$ подбором соответствующего закона изменения $i_{\text{тр}}$ в течение импульса.

Как указывалось выше, собственная частота контура выбрана равной частоте напряжения, питающего трансформатор. Так, на установке, которая будет описана ниже, $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{12}}} = 50 \text{ гц}$ и питание первичной обмотки осуществляется непосредственно от сети.

Для обеспечения постоянства градиента электрического напряжения вдоль центральной части магнитопровода количество ампервитков у каждого воздушного (точнее, газового) зазора должно быть пропорционально его магнитному сопротивлению μ ($N_1 = \frac{1}{\mu_1} \frac{1}{N_2}$). На каждый зазор δ между дисками приходится две секции 2. Зазор между самым верхним диском и головой 4 в два раза меньше и на него приходится только одна секция 2. То же относится к зазору между самым нижним диском и основанием магнитопровода 16. Отношение числа ампервитков в катушке 7 к общему числу ампервитков всех секций 2 равно $\frac{R_0}{16R_0}$, где R_0 - магнитное сопротивление участка a , к которому приложено полное напряжение, R_0 - магнитное сопротивление зазора δ между дисками. Эквивалентная схема магнитопровода с вторичной обмоткой показана на рис. 4. Здесь δ и e соответствует ампервиткам катушки 7 и секции 2. Из условия обеспечения примерно равной напряженности электрического поля в газовых зазорах размер a равен (или несколько больше) сумме всех междисковых зазоров и, следовательно, $R_0 \gg R_0$, $i_{7m} w_7 = \Phi_m R_0$, где $i_{7m} w_7$ - амплитудное значение ампервитков катушки 7, Φ_m - амплитуда основного потока. Для обеспечения нужного $i_{7m} w_7$ при относительно малом напряжении на катушке 7 по её виткам пропускается ток, на несколько порядков больший, чем по секциям 2. Для получения заданного i_{7m} к катушке 7 подсоединяется конденсаторная батарея I2, ёмкость которой определяется из соотношения $C_{12} = \frac{i_{7m}}{w_7 U_{7m}}$, где U_{7m} - максимальное напряжение на катушке 7; $U_{7m} = U_n \frac{w_7}{w_n}$. При выполнении указанных условий амплитуды магнитной энергии в зазоре a и электрической энергии в ёмкости I2 будут равны, что следует из идентичности условий $i_{7m} w_7 = \Phi_m R_0$ и $i_{7m} = w C_{12} U_{7m}$, с одной стороны, и

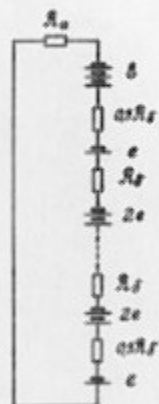


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема магнитопровода:

- δ - ампервитки катушки головы;
- e - ампервитки секции вторичной обмотки;
- R_0 - магнитное сопротивление между головой и наружными деталями магнитопровода;
- R_0 - магнитное сопротивление зазора между дисками.



$$C_{12} U_{\text{тр}}^2 = C_{\text{тр}}^2 P_{\text{а}} - \text{с другой.}$$

Одной из особенностей описываемого трансформатора является большое число зазоров в магнитопроводе. Легко показать, что такая система будет иметь максимальную добротность при определенном соотношении δ/Δ , где Δ - высота дисков δ . Как известно, добротность определяется соотношением $Q = \frac{P_{\text{реакт}}}{P_{\text{м}} + P_{\text{ст}}}$, где $P_{\text{реакт}}$ - реактивная мощность, $P_{\text{м}}$ и $P_{\text{ст}}$ - потери в меди и стали. Если заданы рабочая частота, материал магнитопровода и обмотки, а также габаритные размеры магнитопровода (полная длина и сечение в каждом месте), то

$$P_{\text{реакт}} = k_1 \frac{i^2}{R}, \quad P_{\text{м}} = k_2 \frac{i^2}{L}, \quad \text{и} \quad P_{\text{ст}} = k_3 \frac{i^2}{R^2},$$

где $R = \frac{\rho l}{S}$ - полное магнитное сопротивление магнитопровода, k_1 , k_2 и k_3 - коэффициенты, постоянные при заданных условиях. Отсюда следует, что

$$Q = \frac{k_1 R}{k_2 R + k_3} \quad (5)$$

Как видно из (5), Q является функцией магнитного сопротивления цепи R . Из условия $\frac{dQ}{dR} = 0$ находим величину $R = \sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$, соответствующую максимальной добротности индуктивности трансформатора. Величины δ и Δ , обеспечивающие $\Sigma \frac{l_i}{\mu_i S_i} = R = \sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$, легко могут быть подсчитаны. Не трудно видеть, что при $R = \sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$ имеем $P_{\text{м}} = P_{\text{ст}}$, т.е. добротность максимальна при равенстве потерь в обмотке и стали трансформатора.

Таким образом, в описываемой установке величина зазоров δ между дисками определяется как необходимой электрической прочностью, так и условием получения максимальной добротности.

8. Параметры установки ЗЛТ-1,5

Перед описанием конструктивных особенностей ускорителя ЗЛТ-1,5 приведем его основные параметры:

Напряжение питания первичной обмотки - 220/380 в, 50 гц
 Максимальное напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода - 1,7 Мв

Максимальное ускоряющее напряжение на трубке	- 1,5 Мв
Диапазон изменения ускоряющего напряжения	- 400 кв - 1,5 Мв
Стабильность ускоряющего напряжения	- до 2%
Средняя мощность электронного пучка в основном рабочем режиме ($U_{\text{тр}}=1,5$ Мв)	- 25 квт.
Диапазон изменения средней мощности	- 0-25 квт.
Отношение $\alpha = \frac{U_{\text{тр}}}{U_{\text{нм}}}$ для основного режима	- 0,88
Длительность импульсов тока для основного режима.	- 5 нсек
Средний ток в основном режиме	- ок. 17 ма
Максимальный ток в импульсе в основном режиме	- 100 ма
Суммарные потери в обмотках и магнитопроводе трансформатора, а также в индукторе и системе его питания в основном режиме	- ок. 2,5 квт.
Индуктивность трансформатора L	- $4 \cdot 10^4$ гн
Общая ёмкость трансформатора C	- $250 \cdot 10^{-12}$ ф
Собственная частота контура LC	- 50 гц
Индуктивность рассеяния первичной обмотки в основном режиме	- $4,6 \cdot 10^{-4}$ гн
Габариты ускорителя с выпускным устройством и вакуумным насосом	- высота 3,8 м ширина 1,3 м
Габариты котла	- высота 2,1 м диаметр 1,2м

Давление газа в котле - 15 атм.

Вес ускорителя - 8 тн.

4. Конструкция ЭЛТ-1,5

Трансформатор

Магнитопровод изготовлен из пластин трансформаторной стали 343 толщиной 0,35 мм, склеенных эпоксидной смолой. Диск 3 (всего 16 штук), голова 4 и другие детали магнитопровода набраны из пластин, расположенных радиально, и после пропитки смолой по специальной технологии обработаны по торцевым поверхностям с целью получения качественной поверхности /2/. Зазоры $\delta=6$ мм и напряжение на них около 100 кв при номинальном напряжении на ускорителе 1,5 Мв. Зазор $a=120$ мм и максимальная напряженность в газе ок. $160 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ при напряжении на вторичной обмотке 1,5 Мв. Голова 4 (рис.5) и другие детали магнитопровода обработаны после склейки для получения нужной формы и качества поверхности. Для того, чтобы избежать закорачивания пластин при механической обработке, толщина изоляции между пластинами доходит до 0,15мм. В дисках и голове имеются центральные отверстия со встроенными замкнутыми медными кольцами 22. На кольца опираются несущие изоляционные цилиндры 23. С кольцами 22 имеют электрический контакт пластины трансформаторного железа дисков, их касаются также упругие контакты 24 ускорительной трубки. Кольца 22 экранируют, практически, до нуля магнитные поля трансформатора в области трубки.

Первичная обмотка I намотана на медный экран 25, изоляцией служат стеклотекстолит и эпоксидная смола. Обмотка питается от сети 380 в, 50 гц.

Каждая секция 2 вторичной обмотки имеет 3550 витков сечением $0,1 \text{ мм}^2$. Секции соединены последовательно. Рабочее напряжение на каждой секции ок. 50 кв. Как видно из рис.1, зазор между соседними секциями 2 меняется с радиусом, что обеспечивает, примерно, равную напряженность электрического поля между секциями. Испытательное напряжение на секциях

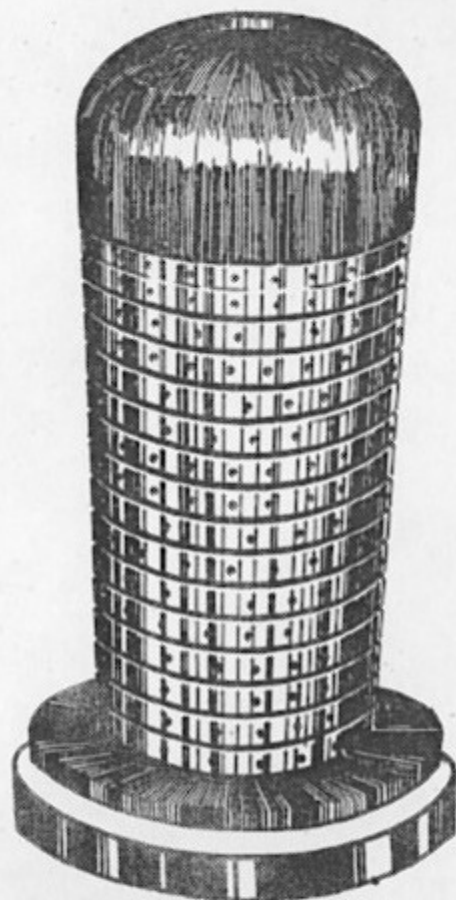


Рис. 3

в 1,5-2 раза превышает рабочее. Для предохранения вторичной обмотки при тренировочных пробоях на землю от обгорания имеются экраны 26, от перенапряжений на секциях - разрядники 27. Междошовная изоляция - бумага, пропитанная эпоксидной смолой. После специальной пропитки /3/ секции монолитны и имеют необходимые электрические и механические характеристики. Катушка головы 7 имеет 36 витков. Конденсаторная батарея 12 состоит из 24 конденсаторов общей ёмкостью 480 мкф с рабочим напряжением 500 в и расположена в полости головы 4. При выбранных геометрических размерах трансформатора и числе витков вторичной обмотки собственная частота системы 50 гц.

Индуктор и ускорительная трубка

Индуктор экспериментальной установки имеет барилдлантановый катод \varnothing 5мм с косвенным подогревом и управляющий электрод 9. При напряжении на всей трубке 1,5 Мв напряжение на управляющем электроде относительно катода, полностью запирающее ток, U_c закр^т 2кв.

В экспериментальной установке ускорительная трубка разборная и состоит из восьми одинаковых секций, соединяемых друг с другом через резиновые уплотнения. Каждая секция изготовлена из эпоксидных колец, склеенных с дуралевыми электродами. Полная длина трубки ок. 1,2 метра, общее число изоляционных колец 64. Разнос напряжения на электродах производится посредством упругих контактов 24 в 18 точках с дисками 3, головой 4 и основанием магнитопровода 16, на промежуточных кольцах - омическим делителем 28. В настоящее время идет обработка трубок из керамики с минимальным числом вакуумных стыков.

Для обеспечения минимальных размеров интенсивного электронного пучка в трубке установлено 16 короткофокусных постоянных магнитных линз 29 (см., например, /4/), которые обеспечивают диаметр пучка 3-5 мм при токе около 100 ма .

У оси трубки имеются экраны 30, изготовленные из сплава, содержащего 88% свинца, существенно ослабляющие радиацию, возникающую от попадания электронов на электроды и других эффектов. Для обеспечения вакуумной откачки электроды 31 имеют отверстия, смещенные в соседних электродах друг относительно друга. Трубка откачивается насосом Н5С с азотной ловушкой.

Индуктор, а также трубка вынимается вверх через голову 4 без снятия котла. Электроды 31 с линзами 29 и экранами 30-легкосъемные и могут быть заменены при экспериментировании или выходе из строя при работе. Шаровая опора 32 и уплотнение трубки 33 обеспечивают мягкое крепление и отсутствие нагрузок на изолятор при несосности трубки с колонной магнитопровода.

Котел, выпускное окно и другие системы.

Котел 15, в котором размещен трансформатор, заполнен смесью фреона и азота при давлении до 15 атмосфер. Поддача газа в котел производится через сушилку. Весь ускоритель после переборки просушивается под вакуумом.

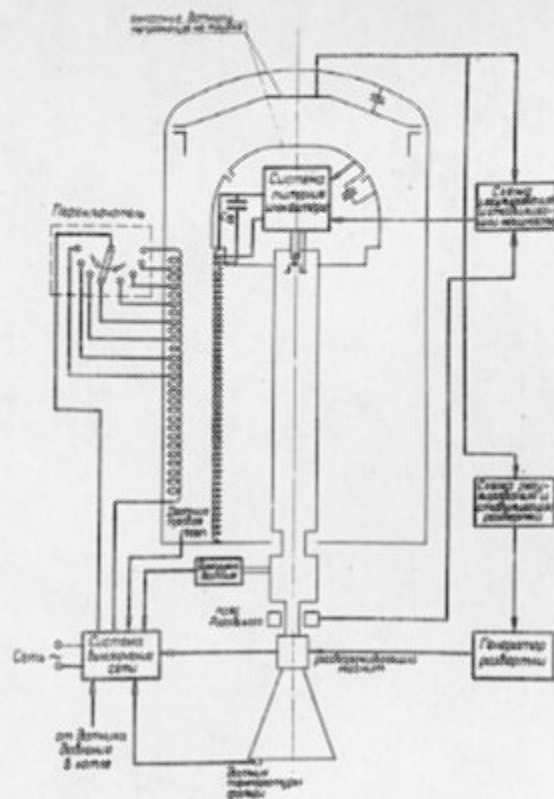
Конструкция системы выпуска электронного пучка в атмосферу определяется конкретной технологией, для которой используется ускоренные электроны. В экспериментальном ускорителе осуществляется выпуск через окно из титановой фольги толщиной 50 микрон и площадью 400 x 40 мм, которая охлаждается сжатым воздухом.

Приняты меры, чтобы радиация, возникающая при торможении пучка в облучаемом изодели, не попадала в трансформатор. Для этого под котлом установлена стальная защита 34.

Несмотря на высокий кпд ускорителя, потери в обмотках и магнитопроводе трансформатора, а также в индукторе и системе его питания составляют около 2,5 квт. Для снятия тепла имеется охлаждаемый водой радиатор 35 и вентилятор 36, обеспечивающий принудительную циркуляцию газа в котле.

5. Системы управления и автоматики

Принципиальная схема управления и автоматики показана на рис.6. Изменение напряжения на вторичной обмотке производится изменением коэффициента трансформации, для чего имеется ряд отводов первичной об-



Принципиальная блок-схема управления и автоматики.

Рис. 6.

мотки и переключатель. Регулирование напряжения на вторичной обмотке осуществляется ступенями через 50-100 кв. Плавная регулировка напряжения на трубке может производиться варьированием величины подсади $\alpha = \frac{U_{TP}}{U_{TP0}}$ за счет изменения ширины импульсов тока $t_2 - t_1$ и, следовательно, некоторого изменения величины средней мощности $P_{полн}$. Стабилизация заданной мощности также осуществляется подстройкой ширины токовых импульсов. Эти операции выполняет схема регулировки и стабилизации мощности, датчиками которой является пояс Роговского и ёмкостной датчик напряжения на трубке, расположенный со стороны земли.

Система питания инжектора вырабатывает напряжение на управляющем электроде U_3 , необходимое для обеспечения $i_{TP}(t)$, нужного для поддержания постоянного напряжения на трубке. При необходимости поддерживать постоянство U_{TP} с точностью до 2% или выше в системе питания инжектора устанавливается схема с обратной связью, вырабатывающая U_3 и имеющая на входе ёмкостной датчик напряжения на трубке, расположенный в головке 4. Для целей облучения, когда возможна монохроматичность энергии электронов 5-10%, вместо схемы регулирования может быть установлен источник постоянной адо, полностью запирающий ток инжектора, и навстречу ему включен ёмкостной датчик головки. Тогда в зависимости от соотношения между величиной постоянной адо и адо, возникающей на ёмкостном датчике, инжектор будет открытым на заданное время $t_2 - t_1$. Может быть также установлена схема, обеспечивающая $U_{TP} = const$ или другие заданные законы $U_{TP}(t)$ по заложенной программе.

Система питания инжектора обеспечивает также накал катода. Сама система питается от части витков вторичной обмотки. Для обеспечения постоянного питания катода и других схем, заложенных в головке 4, при изменении напряжения на трубке от 400 кв до 1,5 Мв в системе питания инжектора имеется соответствующая система стабилизации. Различные регулировки в системе питания, находящейся под высоким потенциалом, - изменение накала катода, ширины импульса тока и др. - производится с помощью приводов из изоляционных нитей, как в обычных электростатических генераторах. Успешно апробировалось также включение светом схемы с обратной связью, вырабатывающей U_3 . Источник света располагался со стороны земли, а фотодиод - в головке 4. В такой системе момент t_1 , когда начинает работать схема регулирования и по трубке течёт ток, задаётся на каждом периоде напряжения, пропускание электронов по трубке может производиться как одиночными импульсами, так и с любой частотой

повторения до 50 раз в секунду.

Генератор развертки обеспечивает линейное изменение поля в магните, разворачивающем электроны вдоль длинной стороны выпускного окна (400 мм). Частота развертки 2 кгц. Поддержание постоянного угла развертки при различных энергиях электронов осуществляется схемой регулирования и стабилизации развертки. Во втором направлении пучок разворачивается синусоидальным напряжением 50 гц.

Для отключения сетевого напряжения при нарушении работы какого-либо из узлов ускорителя имеется система выключения сети.

6. Экспериментальные результаты

Установка ЗвТ-1,5 была опробована в различных режимах работы. Осуществлялось ускорение пучка как отдельными импульсами, так и с частотой повторения до 50 гц. Основные измерения тока пучка производились цилиндром Фарадея, расположенным в воздухе, и пентодом Роговского. Энергия пучка определялась по ёмкостному датчику, расположенному на зазоре а. Измерение средней мощности проводилось как тепловым методом, так и по потребляемой трансформатором мощности за вычетом потерь, определенных из опытов холостого хода и короткого замыкания. Ускорение электронов производилось в диапазоне энергий от 400 кэв до 1,5 Мэв. При энергии 1,5 Мэв средняя мощность составляла около 25 квт, средний ток 17ма, максимальный ток в импульсе 100ма при ширине импульсов 5мсек, кпд ускорителя ок. 90%. Регулировка ширины импульсов производилась от 0 до 5 мсек.

Размер пучка на выходе из трубки при средней мощности 25 квт около 5 мм в диаметре. Развертка пучка производилась в двух направлениях - на углы $\pm 25^\circ$ и $\pm 2,5^\circ$.

Максимальное значение средней мощности, полученное в кратковременном режиме, составило около 30 квт.

7. Заключение

Опыт создания и запуска первого экспериментального ускорителя ЗвТ-1,5 показал осуществимость предложенной схемы и правильность расчетов, положенных в основу описанной выше установки. Высокий кпд при значительной средней мощности позволяет использовать аналогичные установки в различных энергетических радиационных процессах, в металлургии и для других целей.

Наиболее близки по параметрам к описанной установке ускорители прямого действия - динамитрон, трансформатор с изолированным сердечником и резонансный трансформатор (см., например, 5,6). Динамитрон и трансформатор с изолированным сердечником (Insulating Core Transformer-ICT) требуют для своего питания преобразователи на высокую частоту, первый - на сотни килогерц и второй - около килогерца. Выпрямление напряжения в обеих системах производится с помощью многих выпрямительных ячеек, что усложняет получение высокой надежности. Резонансный трансформатор, описанный в(6), также работает на частоте выше промышленной. Системы с высокочастотным ускорением - линейные ускорители и микротроны - хотя и имеют большие предельные энергии, чем перечисленные установки, обладают существенно более низким кпд и, по-видимому, в диапазоне энергий 1-3 Мэв не конкурентноспособны в областях промышленного использования, требующих пучков с мощностью во многие киловатты.

Наиболее существенными отличиями установок типа ЗвТ является выпрямление и стабилизация ускоряющего напряжения с помощью самого электронного пучка, а также питание установки от сети промышленной частоты 50 (или 60) гц. Кроме того, такие установки позволяют вести ускорение с заданным распределением электронов по энергиям, что необходимо, в частности, для получения равномерной дозы по толщине облучаемого материала.

Недостатком ускорителей такого типа является существенное превышение импульсной мощности пучка над средней. По-видимому, это не накладывает ограничений на возможности применения ускорителей, т.е. для энергетических процессов необходимые дозы набираются за многие сотни импульсов, что, практически, эквивалентно воздействию непрерывного пучка. Наибольшие трудности возможны в ускорительной трубке, которая должна

рассчитываться на пропускание токов, в несколько раз больших средних. Однако разработанная конструкция трубки позволяет пропускать необходимые импульсные мощности.

Другой недостаток описываемой системы - повышение (до 10-15%) обратного напряжения на трубке по сравнению с ускорителем. Однако это не сказывается на общей электрической прочности системы, так как, как известно, в отсутствии пучка и неизменно отсутствующей ему радиации (хотя и ослабленной специальными экранами), установка (трубка и газовые зазоры) способна выдерживать большие напряжения.

Дальнейшие усовершенствования электронного трансформатора позволят как увеличить энергии частиц, получаемые на таких установках, так и средние мощности. По-видимому, в дальнейшем удастся достигнуть кпд, близкий к кпд обычного трансформатора - 95-98%. В настоящее время производится отработка конструкции ускорителя на 1,5 Мэв, предназначенного для серийного выпуска.

В заключение считаем своим приятным долгом поблагодарить сотрудников Института ядерной физики СО АН СССР, принявших наибольшее участие в конструировании и наладке установки: инженеров - Г.Крайнова, В.Николаева, И.Палахова, механиков - В.Биркова, Г.Балинова, М.Воронова, М.Губина, Ю.Ефременкова, А.Косачева, М.Степанова и техника В.Кирова.

Л и т е р а т у р а

1. Абрамн Е.А., Гапонов В.А. Устройство для ускорения заряженных частиц с высоким кпд. Авторская заявка № 906570/ 26-25 от 15.06.1964г.
2. Абрамн Е.А., Гапонов В.А., Клеев Л.М., Крайнов Г.С., Николаев В.С., Палахов И.М. Способ изготовления секций магнитопровода трансформатора. Авторская заявка № 1088950/ 24-7 от 22.II.1965г.
3. Абрамн Е.А., Гапонов В.А., Киров В.Н., Клеев Л.М., Крайнов Г.С., Николаев В.С., Палахов И.М. Способ изготовления обмотки высоковольтных трансформаторов. Авторская заявка № 1054400/24-7 от 19-02-1966г.
4. G. Burnot et Lafoucriere, Nucl. Instruments and Methods, 32, 1965, p. 287.
5. M.R. Cleland, K.H. Morganstern, Nucleonics, aug., 1960, p. 52.
6. E.E. Charlton, W.F. Westnicrop, Electronics, dec., 1944, p. 128.

Ответственный за выпуск В.С.Николаев
Тираж - 250 экз. Бесплатно
Отпечатано на ротарите в ИЯФ СО АН СССР
28.02.66г. яд.