

## ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ (ИУ).

ИУ состоят из импульсного генератора с повышающим импульсным трансформатором и ускорительной трубки.

Генератор ускорителя вырабатывает прямоугольные импульсы напряжения, которые подаются на первичную обмотку повышающего импульсного трансформатора. Как правило, применяют схему с частичным разрядом конденсатора с формирующим устройством. В первом случае в качестве импульсного элемента используют высоковольтные модуляторные лампы, типа ГНИ-2Б и др., во втором случае, - роль управляющих элементов генератора выполняют, как правило, импульсные водородные тиратроны типа ТГИ 1-2500/35.

Современные генераторы дают возможность получать импульсы напряжения амплитудой 30-50 кВ, которое с помощью импульсного трансформатора повышают до 0,8-1МВ. Разработка импульсных трансформаторов представляет сложную инженерно-техническую задачу. При их конструировании необходимо обеспечить неискаженную передачу трансформируемого импульса и надежную изоляцию высоковольтного вывода вторичной обмотки, Эти трудности усугубляются тем, что трансформатор должен иметь большой (свыше 10) коэффициент трансформации. Для сердечника трансформатора используют ленточную холоднокатаную кремнистую сталь. Обмотки выполняют т.о., чтобы свести к минимуму межвитковую паразитную емкость. Сердечник с обмотками помещают в бак, наполненный трансформаторным маслом. На верхней крышке бака устанавливают изолятор высоковольтного вывода вторичной обмотки.

Наряду с ИУ, основанными на что трансформировании прямоугольных импульсов напряжения, имеются У, в которых первичная обмотка повышающего трансформатора питается синусоидальным напряжением промышленной частоты. УТ подключаются ко вторичной обмотке и находится под воздействием высокого переменного напряжения. Трубка имеет управляющий электрод, который позволяет регулировать величину тока через ее, вплоть до полного запираения. Импульсный режим работы У осуществляется путем подачи отпирающих импульсов напряжения на управляющий электрод в моменты времени, когда напряжение, приложенное к трубке, соответствует режиму ускорения частиц. Как правило, это происходит тогда, когда напряжение почти достигает амплитудного значения. Несмотря на то, что напряжение на вторичной обмотке изменяется по синусоидальному закону, за время действия коротких управляющих импульсов напряжения на трубке остается практически постоянным. Так, если импульс подавать в пределах  $\pm 1$  эл град. (что при частоте 50 гц соответствует длительности импульса примерно 100 мсек) относительно момента времени когда величина  $U_2$  достигает амплитудного значения, то напряжение на трубке изменится всего на 0,02%. Если длительность работы У составляет большой промежуток времени ( $t_{и} \geq 1$  мсек), то стабилизация напряжения на трубке осуществляется при помощи регулирования тока в ней. С этой целью на управляющий электрод подается импульс специальной формы. По

этому принципу работает У электронов на 1,5 МэВ в ИЯФ Сибирского отделения АН России.

Трансформатор этого У имеет секционированную вторичную обмотку, расположенную коаксиально с первичной. Центральная часть сердечника состоит из 16 отдельных, изолированных друг от друга дисков, с которыми соединяется средняя точка двух соседних секций вторичной обмотки. В центре дисков имеются отверстия, через которые проходит УТ. Трубка разбирается и состоит из 8 одинаковых секций, соединенных между собой резиновыми уплотнителями.

Источником электронов является подогревный катод из гексаборида лантана. Общая длина УТ 1,2 м. Напряжение на промежуточных электродах устанавливается с помощью делителя.

Весь ускоритель помещается в бак, наполненный смесью фреона и азота при давлении 15 атм. Выпуск ускоряемых электронов из трубки осуществляется через окно из титановой фольги толщиной 50 мкм и площадью 400x40 мм. У может работать как в режиме одиночных импульсов, так и в периодическом режиме с частотой следования импульсов до 50 гц. Максимальный ток ускоренных электронов 0,1 А. Наибольшая длительность импульса 5 мс. Диаметр пучка на выходе трубки 5 мм. Максимальное значение средней мощности в кратковременном режиме достигает 30 кВт. Габариты Н-3,3 м, D-1,3 м, вес 8 т. Разработаны импульсные ускорители на энергию до 1 МэВ и ток свыше 1000 А. при длительности импульса 10-100 мксек.

Назначение ИУ.

Использование импульсного режима работы У совместно с временной селекцией регистрируемых событий позволяет существенно расширить круг задач, решаемых с его помощью. В первую очередь к таким задачам относятся:

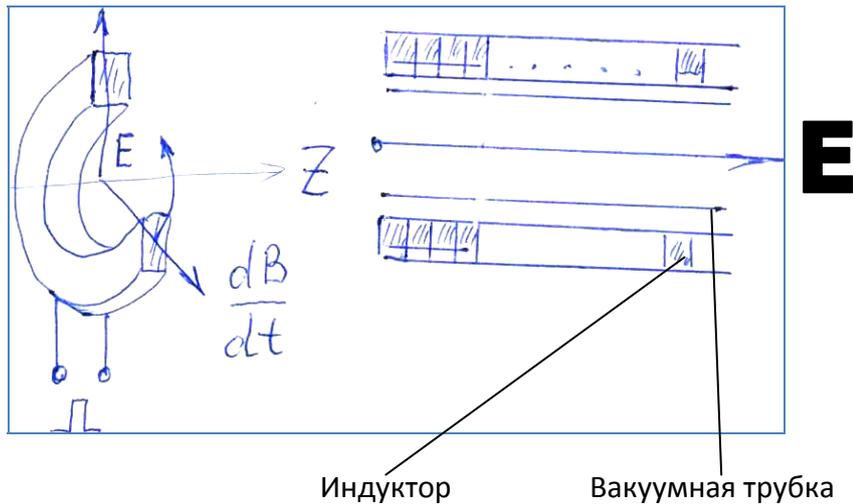
1. Изучение короткоживущих ядер, образующихся либо непосредственно под действием ускоряемых ионов, либо под действием вторичных частиц, вылетающих из мишени. Сравнивая распределение во времени интенсивностей падающих частиц и изучаемого излучения, можно измерить периоды полураспада примерно до  $10^{-11}$  с, если длительность импульсов тока частиц пучка равна  $10^{-9}$  с.
2. Измерения, проводимые в условиях большого фона.
3. Ядерная спектроскопия.
4. Измерение констант скоростей быстрых реакций.

## ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ (ЛИУ)

Первые ЛИУ созданы в 60-е годы 20-го века. ЛИУ экономичны и просты по конструкции, они позволяют получать электронные пучки большой интенсивности и с высокой моноэнергетичностью.

Работа ЛИУ основана на явлении электромагнитной индукции. Рассмотрим ферромагнитное кольцо-сердечник, на которое нанесена электрическая обмотка. Если изменить ток в обмотке, то произойдет изменение индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$ . В сердечнике и в окружающем пространстве возникает вихревое электрическое поле  $\mathbf{E}$ . Связь между полями  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$  устанавливается вторым уравнением Максвелла  $\text{rot } \mathbf{E} = - (d\mathbf{B}/dt)$

Силовые линии вихревого электрического поля замыкаются вокруг сердечника. В центре сердечника напряженность поля  $\mathbf{E}$  совпадает с осью симметрии ячейки. Вихревое электрическое поле и используется для ускорения электронов в ЛИУ.



Ускоряющая система ЛИУ состоит из большого числа ячеек описанной конструкции, называемых индукторами. При изменении индукции магнитного поля в сердечниках ячеек на оси ускоряющей системы возникает вихревое электрическое поле, которое (при достаточной длине системы) определяется выражением

$$E = - \frac{N}{L} S \frac{dB}{dt}$$

$N$ - число сердечников;  $L$  – длина системы;  $S$ - сечение одного сердечника;

$dB/dt$  – скорость изменения индукции в сердечнике.

Для того, чтобы пучок электронов на выходе  $U$  был моноэнергетичным, необходимо обеспечить изменение индукции магнитного поля во времени по линейному закону. С этой целью питание обмоток индукторов осуществляют короткими импульсами напряжения прямоугольной формы. Напряженность вихревого поля на оси системы в этом случае рассчитывается по формуле

$$E = - \frac{N}{L} S \frac{\Delta B}{t_{\text{и}}}$$

Где  $\Delta B$  – приращение индукции в сердечнике за время импульса  $t_{\text{и}}$ .

Энергия электронов, прошедших путь  $L$  вдоль вихревого поля

$$W = e^{-} \int_0^L E dZ = e^{-} NS \frac{dB}{dt}$$

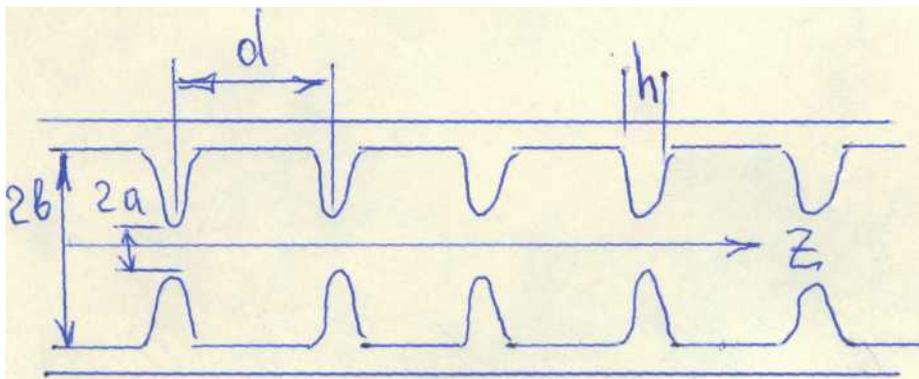
В современных ЛИУ скорость изменения индукции  $\Delta B / t_{и}$  выбирают в пределах  $10^6 - 10^7$  Т/сек. Длительность импульсов обычно равна 50-500 нсек.

Ускорение электронов осуществляется в вакуумированной трубке (вакуум  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст), находящейся при непрерывной откачке. В некоторых типах ЛИУ вакуумная камера образуется непосредственно индукторами. В качестве инжектора электронов в ЛИУ используют электронные пушки. Высоковольтным источником служат, как правило, высоковольтные трансформаторы.

Импульсный ток ЛИУ электронов составляет сотни ампер и более, что на 2-3 порядка превышает ток линейных электронных ускорителей с бегущей волной. Т.к. в таком интенсивном пучке в значительной мере проявляются кулоновские силы расталкивания, применяют фокусирующую систему, состоящую из магнитных линз, которые устанавливают в промежутках между секциями ускоряющей системы или индукторов

### Линейные резонансные ускорители с бегущей волной

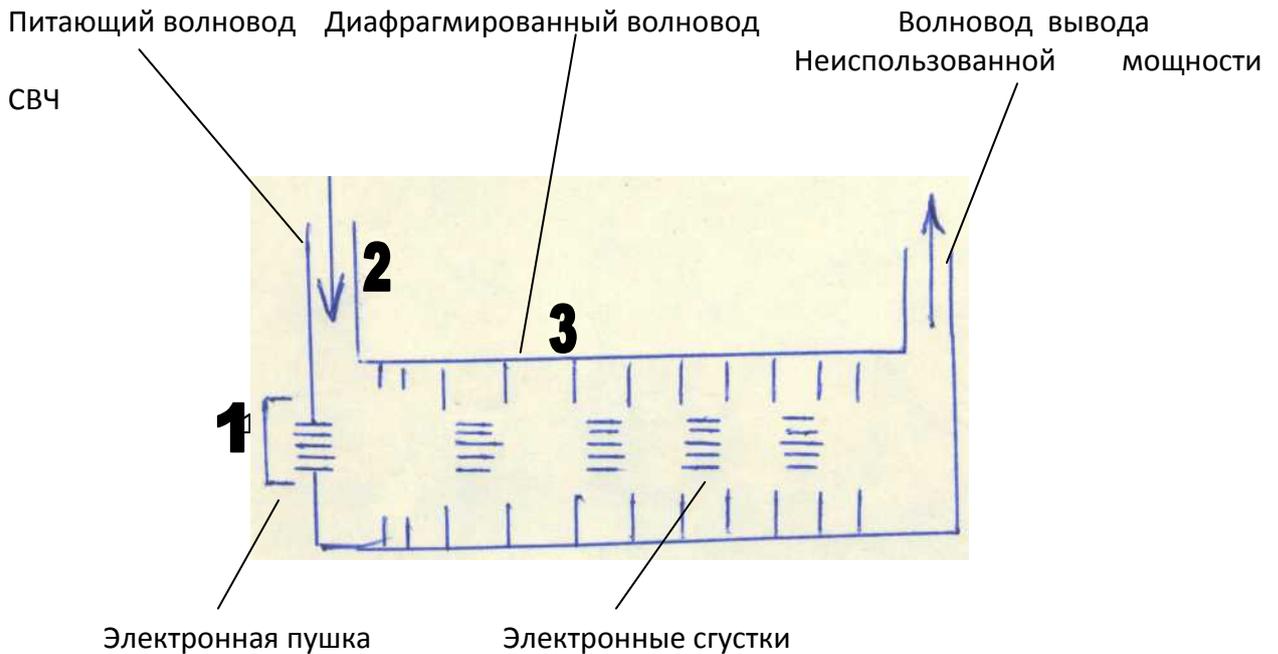
Первые ЛРУ БВ были разработаны и построены в конце сороковых годов. К настоящему времени эти приборы получили самое широкое распространение не только в физических исследованиях, но и в медицине, промышленности (дефектоскопия, терапия, облучение полимеров и т.д.) . Ускоряющей системой таких установок является цилиндрический диафрагмированный волновод в котором возбуждается бегущая электромагнитная волна с фазовой скоростью  $V_{\phi}$ , равной скорости электронов  $V_{э}$ . Электроны ускоряются продольной составляющей электрического поля бегущей волны и приобретают энергию, перемещаясь вместе с волной вдоль оси волновода.



Для того, чтобы осуществить ускорение электронов полем бегущей волны, необходимо выполнить условие  $V_{\phi} = V_{э}$ . Фазовая скорость электронных колебаний, распространяющихся в волноводе зависит от их длины волны и конструкции волновода. В гладком волноводе ( в виде полой круглой трубы)  $V_{\phi}$  всегда больше скорости света  $C$ . Отсюда следует, что гладкий волновод не пригоден для ускорения электронов, т.к. частицы не могут перемещаться со скоростью большей скорости света.

Для достижения равенства между фазовой скоростью волны и скоростью электронов, необходимо уменьшить величину  $V_{\phi}$  Это может быть достигнуто рядом способов. В ускорительной технике наиболее удобным оказался метод замедления волны с помощью системы круглых проводящих диафрагм, установленных в цилиндрическом

волноводе. Ячейки диафрагмированного волновода можно рассматривать как совокупность связанных через отверстия обычных резонаторов. Фазовая скорость распространения волны через диафрагмированный волновод зависит от его параметров: радиуса волновода ( $b$ ), радиуса отверстия в диафрагмах ( $a$ ), расстояния между диафрагмами ( $d$ ) и толщины диафрагм ( $h$ ). Т.о. выбором геометрии волновода можно добиться требуемого значения  $V_\phi$ . На начальной стадии процесса ускорения скорость электронов невелика. Постепенно возрастая, она становится практически равной скорости света. Схематическое изображение ЛРУ БВ приведено на следующем рисунке.



Ускоритель работает следующим образом. Электроны вводятся в диафрагмированный волновод (3) с помощью высоковольтной электронной пушки (1). Режим инжекции импульсный. Энергия импульса электронов примерно 30-100 кэВ. Двигаясь вдоль волновода, электроны сталкиваются с мишенью или выводятся наружу через специальные окна. Для питания волновода используют мощные генераторы СВЧ колебаний – импульсные магнетроны или клистроны в диапазоне длин волн  $\lambda = 10-25$  см. СВЧ колебания в диафрагмированный волновод поступают через гладкий питающий волновод (2). В конце  $У$  неиспользованная мощность СВЧ колебаний бегущей волны отводится в поглощающую нагрузку. Ускоритель работает при непрерывной откачке. Особенности исполнения УБВ являются: высокие требования к диафрагмированному волноводу, требования к стабилизации теплового режима, стабильность частоты генератора СВЧ, тщательная центровка прибора. Конструктивное решение  $У$  зависит от его назначения.  $У$  на небольшие (до 4-5 МэВ ) энергии могут быть выполнены в виде малогабаритных стационарных или передвижных установок, удобных для использования в условиях промышленного предприятия или медицинского учреждения. В ряде случаев  $У$  снабжают специальной магнитной головкой, которая позволяет менять направление выхода электронного пучка. В настоящее время в эксплуатации находятся несколько ЛУЭ на энергию свыше 1 ГэВ, построенных для нужд ядерной физики. К их числу относится  $У$  на 2 ГэВ, запущенный в 1965 году в Харьковском физико-техническом институте,

который был самым крупным в мире до пуска Станфордского линейного ускорителя (СЛАК) на котором получали ускоренные электроны с энергией 20 ГэВ . (Станфордский университет , США, 1966). Длина ускорителя 3,5 км.

Диафрагмированный волновод харьковского У состоит из 50 секций, питание которых осуществляется от мощных импульсных клистронов. Длина каждой секции 4,5 м. У занимает здание длиной 425 и шириной 21 м. Следует отметить, что стоимость ЛУ растет практически пропорционально их максимальной энергии. При энергии менее (10-15) ГэВ ЛУ являются более дорогими установками, чем циклические У. В диапазоне энергий более (10-15) ГэВ ЛУ существенно дешевле циклических. Современные ЛУ позволяют получить также пучки протонов с энергией до 100 МэВ и выше. Основным элементом протонного У является объемный резонатор, по оси которого установлены трубчатые электроды возрастающей длины. Ускорение протонов происходит в промежутках между трубками электрическим полем стоящей электромагнитной волны, возбуждаемой в резонаторе. Используют ПУ главным образом в качестве инжекционных устройств для крупных ускорителей.