

Совещание по радиоэлектронике ускорителей

В апреле 1964 г. в Дубне в ОИЯИ проходило международное рабочее совещание по радиоэлектронике ускорителей. В работе совещания принимали участие около 70 специалистов из Болгарии, ГДР, Китая, Кореи, Польши, Румынии, Советского Союза, Чехословакии а также сотрудники ОИЯИ.

На совещании обсуждались вопросы, связанные с разработкой новых и совершенствованием существующих электронных систем управления ускорителями, с увеличением эффективности использования действующих ускорителей. Рассматривались методы прецизионных измерений и стабилизации магнитных полей и способы создания высокочастотных ускоряющих систем для ускорителей различных типов. На совещание было представлено 32 доклада, которые были заслушаны на пяти заседаниях. Кроме того, участники совещания посетили лаборатории ОИЯИ и подробно ознакомились с электронными системами и приборами, используемыми при эксплуатации действующих и разработке новых ускорителей заряженных частиц.

Обзорный доклад С. М. Рубчинского был посвящен принципам построения систем радиоэлектроники ряда протонных синхротронов, разрабатываемых в Радиотехническом институте АН СССР. На основе опыта разработки и эксплуатации систем радиоэлектроники протонных синхротронов на 0,2; 7; 10 и 70 Гэв рекомендуются следующие способы построения основных электронных устройств ускорителей такого типа. В системе генерирования ВЧ-напряжения частота широкополосного перестраиваемого задающего генератора $f_{з.г}$ управляется выходным напряжением прецизионного программатора, связывающего определенной функциональной зависимостью напряженность магнитного поля ускорителя H_M и частоту $f_{з.г}$. Дополнительно к этой основной связи $f_{з.г} = \varphi(H_M)$ частота $f_{з.г}$ автоматически корректируется по информации о радиальном и фазовом положении пучка ускоряемых частиц, получаемой при помощи электростатических сигнальных электродов соответствующей формы и размеров. Перестройку выходных контуров ускорительных станций рекомендуется производить при помощи ферритов.

Для управления работой ускорителя применяются два вида программирования — по времени и по магнитному полю. Программирование по времени с дискретностью 1 мксек производится при помощи многоканальных схем, позволяющих получать импульсы управления в интервале времени до 10 сек с точностью $10^{-6} \pm 0,2$ мксек. Датчики времени включаются или в начале цикла электромагнита, или в момент инжекции. Непрерывный контроль за параметрами орбиты и характеристиками пучка ускоряемых частиц производится при помощи нескольких групп электростатических сигнальных электродов. Измерение частоты, временных интервалов, напряжений и сдвига фаз целесообразно производить цифровыми приборами. Для измерения мгновенных значений напряженности магнитного поля следует использовать дискретный интегратор.

В докладе А. А. Васильева приводились характеристики радиоэлектронной аппаратуры кибернетического протонного синхротрона на 1 Гэв, разрабатываемого в Радиотехническом институте АН СССР. Каждый полный цикл работы этого ускорителя делится на четыре периода: обработка первого оборота, инжекция, ускорение и пауза. Необходимый диапазон частот ускоряющего напряжения 1,25—25 Мгц перекры-

вается двумя генераторами, работающими на две автономные группы ускоряющих элементов. Один генератор работает в диапазоне частот 1,25—6,25 Мгц, а второй на частотах 6—25 Мгц. Для первого диапазона ускоряющими элементами служат ферритовые трансформаторы, а для второго используются двойные резонаторы. Перестройка частоты ускоряющего напряжения по информации о радиальном и фазовом положении пучка. Регулировка амплитуды ускоряющего напряжения производится по сумме напряжений на резонаторах всех ускорительных станций. Связь между амплитудой и скоростью изменения напряженности магнитного поля задается программным устройством. В кибернетическом ускорителе коррекция отклонения пучка в период отработки «первого оборота» и устранение смещения равновесной орбиты в процессе ускорения производятся специальными системами автоматического регулирования орбиты. Система коррекции траектории пучка на первом обороте состоит из 20 равномерно распределенных по кольцу трактов, включающих по паре электростатических сигнальных электродов, усилителей и корректирующих магнитов. Система автоматического регулирования равновесной орбиты в процессе ускорения состоит из группы электростатических сигнальных электродов, измеряющих отклонение равновесной орбиты от оси камеры в 20 точках, вычислительного устройства, определяющего величину возмущения, вызвавшего смещение равновесной орбиты, и системы корректирующих магнитов.

Сотрудники ОИЯИ представили несколько докладов, охватывающих широкий круг вопросов, связанных как с улучшением параметров имеющихся в Институте ускорителей, так и с разработкой и исследованием новых методов ускорения заряженных частиц.

И. Б. Иссынский рассказал о принципе работы и устройстве блоков системы программного управления работой синхрофазотрона ОИЯИ при одновременном проведении нескольких экспериментов в одном цикле ускорения. Программатор позволяет в заданной последовательности вводить мишени в зону ускорения, обеспечивать необходимый режим сброса пучка на мишени, включать питание только тех выводных каналов, которые используются для транспортировки пучков вторичных частиц в данном цикле. Одновременно в каждом цикле может проводиться до семи экспериментов.

Системе управления работой фазотрона на 680 Мэв ОИЯИ и синхронизации экспериментальных установок с его работой был посвящен доклад Т. Н. Томилиной. Устройство управления обеспечивает синхронизацию с ускорителем циклов работы различных экспериментальных установок, позволяет реализовать разнообразные режимы ускорения (одноразовый, непрерывный, с накоплением пучка и т. д.), дает возможность управлять специальными устройствами ускорителя (системой растяжки пучка, импульсным питанием дуги ионного источника и т. д.), обеспечивает отключение ускорителя импульсами с экспериментальных установок. Во всех случаях для синхронизации используются импульсы, частота следования которых совпадает с частотой модуляции ВЧ-генератора ускоряющего напряжения. Синхронизирующий импульс вырабатывается при определенном положении лопаток ротора вариатора частоты, фиксируемом световым лучом.

В докладе А. И. Михайлова обсуждались методы стабилизации уровней интенсивности при выводе пучка ускоренных частиц на мишени в синхрофазотроне ОИЯИ и факторы, влияющие на точность работы системы стабилизации. На этом ускорителе используются два метода стабилизации интенсивности пучка, сбрасываемого на внутреннюю мишень. В первом случае «лишние» частицы предварительно выводятся на мишень, используемую в эксперименте, некритичном к интенсивности, а иногда просто сбрасываются на стенки камеры. В этом случае интенсивность циркулирующего пучка измеряется при помощи электростатических сигнальных электродов. Во втором случае число выводимых на мишень первичных частиц (протонов) регистрируется по количеству вторичных частиц, поступающих непосредственно в каналы экспериментальных установок. В докладе подробно анализируется влияние запаздывания в трактах функциональных манипуляторов, управляющих выводом ускоренных частиц на мишени, на точность стабилизации интенсивности используемых пучков.

Г. С. Казанский рассказал о совмещенной работе двух пузырьковых камер в одном цикле ускорения на синхрофазотроне ОИЯИ. Камеры работают последовательно. Вначале, при включенном высокочастотном ускоряющем напряжении, пучок сбрасывается на мишень первой камеры до тех пор, пока через нее не пройдет заданное число исследуемых частиц. Затем ускоряющее напряжение выключается, пучок отходит от первой мишени и оставшаяся часть ускоренных частиц попадает на мишень второй камеры.

В докладе А. П. Царенкова были приведены результаты аналитического и экспериментального исследования метода повышения коэффициента захвата протонов в синхрофазотронный режим ускорения путем бацндровки инжектируемого пучка в «квазибетатронном» режиме высокочастотным ускоряющим напряжением меняющейся частоты. Установлено, что применение такого метода фазовой группировки частиц при инжекции на синхрофазотроне ОИЯИ позволяет повысить захват частиц в синхрофазотронный режим на 30%.

В. Сохор (ЧССР) рассказал о моделировании электростатических полей с учетом влияния объемного заряда при помощи сетки сопротивлений. Объемный заряд моделируется токами, вводимыми в узлах сетки. Приводимые в докладе результаты моделирования электростатического поля инжектора линейного ускорителя показывают, что точность этого метода вполне достаточна для решения многих аналогичных задач.

В докладе Г. П. Пучкова предлагается способ компенсации возмущений равновесной фазы Φ_s паразитными пульсациями магнитного поля синхрофазотрона введением противофазных возмущений пучка ускоряемых частиц посредством модуляции амплитуды высокочастотного ускоряющего напряжения. Применение этого метода стабилизации равновесной фазы на синхрофазотроне ОИЯИ позволило улучшить структуру пучка и подготовить переход к ускорению на одном электроде, так как оказалось возможным осуществлять нормальное ускорение при повышенном в два раза значении амплитуды ускоряющего напряжения.

И. Теодореску (ГНР) рассказал о динамическом методе настройки высокочастотной системы и регулировки параметров пучка ускоренных частиц циклотрона. Для этой цели использовался частотно-модулированный автогенератор-выбросивший в двухлучевой осциллограф с электронным коммутатором, позволяющим одновременно наблюдать несколько подгрупповых характеристик различных уровней высокочастотной

системы. Возможно также при помощи соответствующих зондов наблюдать регулировочные характеристики ускоряемого пучка до и после его выхода из камеры ускорителя.

О генераторе импульсного питания дуги ионного источника синхроциклотрона ОИЯИ доложил В. Г. Тестов. Генератор вырабатывает поджигающие и гасящие импульсы с амплитудами до 0,6 и 3 кВ соответственно. Разряд в источнике ионов во временном интервале между управляющими импульсами поддерживается высокочастотным ускоряющим полем.

В докладе Ю. А. Бычкова обсуждались принципы построения и блок-схема широкополосной телеметрической системы контроля режима ионного источника линейного ускорителя синхрофазотрона ОИЯИ. Разработанная система позволяет наблюдать по видеоканалу на экране осциллографа форму импульса тока ионного источника, а также контролировать по измерительным каналам пять медленно изменяющихся параметров форнижектора. Телеметрическая система состоит из коммутатора каналов, передатчика СВЧ, рупорных антенн, супергетеродинного приемника и видео- и цифровой индикации параметров.

О ядерном магнитометре для прецизионных измерений очень неоднородных магнитных полей и ядерном стабилизаторе напряженности магнитного поля доложил Ю. Н. Денисов (ОИЯИ). В ядерном магнитометре неоднородность поля в объеме ампулы с «рабочим веществом» компенсируется дополнительным магнитным полем с противоположным по направлению градиентом, причем напряженность измеряемого магнитного поля, соответствующая центру ампулы, остается неизменной. Компенсирующее поле квадрупольного типа создается проводниками с током определенной формы и размеров. В докладе приводятся результаты расчета поля двух типов токовых квадрупольей, создающих компенсирующий градиент 3—35 тл/м.

В ядерном стабилизаторе сигнал я. м. р. наблюдается или автодинным методом, или на регенерированном лампой резонансном контуре. Высокочастотное напряжение на контур подается от стабильного диапазона или кварцевого генератора. В зависимости от характеристик корректирующих обмоток в стабилизаторе используются регулирующие блоки, выполненные на вакуумных лампах или на полупроводниковых триодах. Точность стабилизации напряженности магнитного поля (с кварцевым генератором высокой частоты) составляет $\pm 0,002\%$. Несколько вариантов этого стабилизатора в течение длительного времени используется в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ для стабилизации магнитного поля релятивистского циклотрона и ряда экспериментальных электромагнитов с диаметром полюсных наконечников до 120 см.

В докладе Д. П. Василевской (ОИЯИ) излагались результаты длительных экспериментальных исследований характеристик датчиков ЭДС Холла из различных полупроводниковых материалов. Приводились принципиальные схемы магнитометров, предназначенных для измерения стационарных полей, в том числе прецизионного холловского магнитометра, для которого точность измерений H_z составляет $\pm 0,05\%$.

С. А. Ивашкевич (ОИЯИ) сообщил о результатах исследования характеристик нескольких типов плоскостных и точечных германиевых триодов, используемых в качестве датчиков напряженности магнитного поля. В докладе приводятся характеристики магнитометра с датчиком на триоде типа П8. Диапазон измеряемых магнитных полей 0,1—2,4 тл. Точность измерений 1%.

В другом докладе С. А. Ивашкевич рассказал об универсальном портативном ядерном магнитометре, выполненном на полупроводниковых триодах. Диапазон измеряемых прибором магнитных полей $0,043-2,42$ тл. В качестве «рабочего вещества» используется вода, в которую добавлено небольшое количество парамагнитных ионов трехвалентного железа. Точность измерения абсолютной величины напряженности стационарных магнитных полей $0,01-0,02\%$.

Доклад И. Адама (ОИЯИ) был посвящен системе стабилизации постоянного тока, в которой величина тока контролируется по падению напряжения на высокостабильном эталонном сопротивлении, а в качестве нуль-элемента в схеме сравнения используется фотоэлектрический усилитель типа Ф-117/1. Диапазон стабилизируемых токов $0,5-15$ а. Суммарный коэффициент стабилизации обоих контуров системы (по току и по напряжению) составляет $\sim 3 \cdot 10^5$. После двухчасового прогрева ток магнита в течение часа изменяется не более чем на $\pm 0,001\%$.

В докладе В. Г. Кунстмана (НИИЭФА) рассматривалось влияние расстройки контура синхронизированного автодина на величину ошибки в системе стабилизации магнитного поля, основанной на ядерном магнитном резонансе. Показано, что если стабилизируемое магнитное поле имеет относительно невысокую однородность ($0,1-0,01\%/см$), а стабильность и воспроизводимость магнитного поля требуются выше $0,01\%$, то влиянием расстройки контура автодина пренебречь нельзя, так как вызываемое ею отклонение величины поля превышает заданную точность стабилизации. В сообщении приводилась блок-схема системы автоматической настройки резонансного контура автодина на частоту внешнего стабильного захватывающего генератора.

К. Бейне (ГДР) рассказал о системе регулирования энергии каскадного генератора на 2 Мэв.

В докладе В. Богачека (ЧССР) рассматривались основные преимущества высокочастотной ускоряющей системы синхротрона, образованной замкнутым волноводом. Указывается, что при определенных условиях может использоваться замкнутый волновод без замедляющей структуры. Описан способ возбуждения бегущей волны в тороидальном резонаторе и приведено выражение для коэффициента усиления мощности $A = P_{\text{дирк}}/P_{\text{ист}}$. Рассмотрено влияние пространственного заряда пучка ускоряемых частиц на величину коэффициента усиления мощности A .

Этой же теме был посвящен доклад А. И. Диденко, который привел основные результаты, полученные в НИИ Томского политехнического института (ТПИ) при разработке ускоряющих систем синхротронов на основе замкнутых волноводов, полностью расположенных в межполюсном пространстве. Показано, что волноводные ускоряющие системы позволяют сильно сократить время ускорения и эффективнее резонаторных с экономической точки зрения. Кроме того, при использовании слоистых диэлектриков можно успешно решить проблему создания волноводных систем, не экранирующих управляющее магнитное поле. В докладе приведены параметры волноводного циклического ускорителя на 10 Мэв, сооруженного в ТПИ для проверки основных теоретических положений, полученных при разработке ускоряющих систем такого типа.

В сообщении К. Гамала (ЧССР) рассматривается конструкция микроволнового ферритового изолятора на основе феррита, у которого $2\Delta H = 8 \cdot 10^4 = a/m$ и $M = 1,8 \cdot 10^5$ а/м. Экспериментально было достиг-

нуто клапанное отношение $15-40$ (при теоретическом 16) для мощности от $0,8$ до $1,0$ Мвт при коэффициенте стоячих волн 3 и без избыточного давления.

В докладах М. Пахан и А. Меклер (ПНР) излагались характеристики высокочастотной системы и различных магнитных систем протонного линейного ускорителя на 10 Мэв, сооружаемого в Сверке. Приводились принципиальные схемы нескольких типов стабилизаторов тока и ядерного стабилизатора напряженности магнитного поля отклоняющего магнита. Точность стабилизации поля $0,003\%$.

О конструкции и характеристиках перестраиваемых СВЧ-резонаторов высокочастотного тракта безжелезного протонного синхрофазотрона, разрабатываемого в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, рассказал В. С. Панасюк. В этом ускорителе предусматривается механическая перестройка собственной частоты резонаторов с коррекцией до точного закона при помощи небольшого ферритового сердечника. Резонатор является контуром автогенератора. В докладе предлагается блок-схема точной подстройки частоты ускоряющего резонатора под частоту программированного с большой точностью маломощного автогенератора.

В. Г. Шестаков рассказал о мощных генераторах импульсов напряжения и тока, разработанных в ТПИ. Приведены принципиальные схемы двух вариантов генераторов импульсов напряжения с амплитудой до 400 кэ, используемых для питания высоковольтных инжекторов бетатрона. Генератор с графитовым разрядником обеспечивает импульсы длительностью 4 мксек через каждые 4 сек, а если в качестве коммутатора в нем используются два последовательно включенных тиратрона типа ТГИ 1-2500/35, то схема генерирует импульсы длительностью 3 мксек с частотой 50 гц. Генератор мощных импульсов тока для питания системы смещения ускоренных электронов на мишень позволяет получать импульсы длительностью $5-500$ мксек с амплитудой до 2500 а и частотой повторения 50 гц.

И. Теодореску (РНР) сообщил о результатах исследования процесса ускорения релятивистских и нерелятивистских заряженных частиц одиночным резонатором при времени пролета через резонатор, близком к половине периода высокой частоты. Приведены общие критерии для оценки эффективности ускоряющего зазора, нахождения максимальной энергии или максимального захвата частиц для заданного значения напряженности электрического поля или подводимой высокочастотной мощности.

В докладе С. Пепуриану (РНР) предлагается установка для дистанционного измерения положения дуантов в вакуумной камере циклотрона, состоящая из восьми емкостных датчиков (по четыре для каждого дуанта) и одного логометра. Величина вертикального и горизонтального перемещений дуанта определяется непосредственно по шкале прибора, а угол поворота вокруг оси резонансной линии — расчетным путем. Чувствительность установки составляет десятые доли миллиметра.

П. Т. Шишляников, В. И. Прилипо и В. М. Лачикова (ОИЯИ) доложили о разработанных в Лаборатории ядерных проблем двух типах электронно-счетных частотомеров и быстрых полупроводниковых пересчетных схемах для этих приборов. Максимальная скорость счета гибридной пересчетной декады на полупроводниковых триодах туннельных диодах достигает $180-200$ Мгц.

Ю. Н. Денисев