

СИНХРОФАЗОТРОН НА ЭНЕРГИЮ 10 Бэв АН СССР*)

В. И. Векслер, Д. В. Ефремов, А. Л. Минц, М. М. Вейсбейн, Ф. А. Водопьянов, М. А. Гашев, А. И. Зейдлиц, П. П. Иванов, А. А. Коломенский, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Н. А. Монозон, И. Х. Невяжский, В. А. Петухов, М. С. Рабинович, С. М. Рубчинский, К. Д. Синельников, А. М. Столов

Дано краткое описание основных параметров и узлов синхрофазотрона на 10 Бэв. Отдельные вопросы по проектированию и сооружению ускорителя более подробно были изложены в ряде докладов на ускорительной секции Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий.

Введение

Развитие современной ядерной физики находится в непосредственной связи с успехами ускорительной техники. Поэтому естественно, что физики стремятся получить ускоритель частиц возможно больших энергий. Предложение о сооружении ускорителя протонов на 10 Бэв было внесено Академией наук СССР. К этому времени в Советском Союзе был накоплен известный опыт по сооружению и эксплуатации ускорителей протонов и электронов до энергий в сотни миллионов электронвольт. Это позволило приступить к разработке и сооружению гигантского ускорителя на 10 Бэв.

Для сооружения описываемого синхрофазотрона потребовалась совместная работа ученых и инженеров различных специальностей.

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР были разработаны физические основы ускорителя [1], в Научно-исследовательском институте электрофизи-

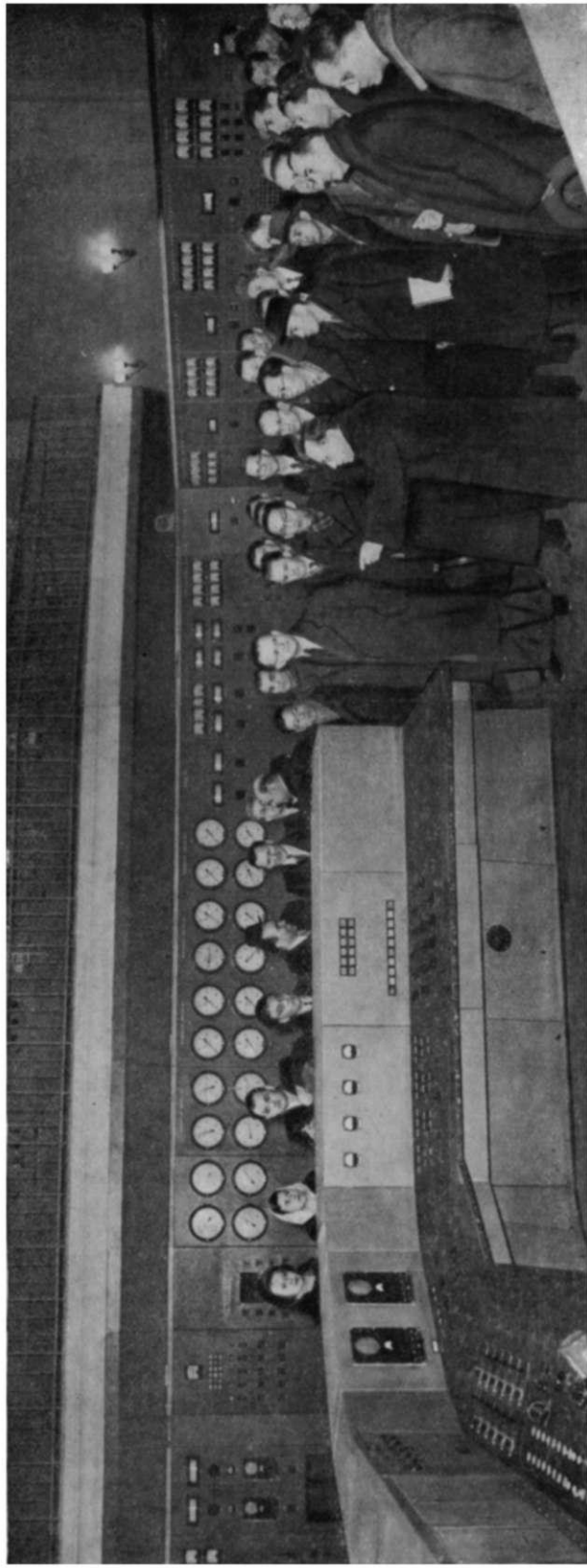
ческой аппаратуры МЭП СССР и в Радиотехнической лаборатории АН СССР были разработаны проекты и основное оборудование ускорителя, в Харьковском физико-техническом институте АН УССР был построен линейный ускоритель-инжектор.

Следует особо отметить большое внимание и поддержку покойного академика С. И. Вавилова в течение первых лет разработки синхрофазотрона на 10 Бэв и помощь, которую постоянно оказывал директор Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР академик Д. В. Скобельцын.

Сооружение ускорителя происходило во вновь созданной Электрофизической лаборатории АН СССР, которая в настоящее время передана в Объединенный институт ядерных исследований. Сооружение ускорителя закончено, и сейчас ведутся наладочные работы.

В статье дано краткое описание ускорителя. Отдельные вопросы проектирования и сооружения ускорителя были изложены более подробно в ряде докладов на ускорительной секции Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий.

*) Доложено на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, Москва, 1956.



Участники Международного совещания по вопросу об организации Восточного института ядерных исследований в Электрофизической лаборатории Академии наук СССР осматривают центральный пульт управления синхрофазотрона на 10 Бэв (март 1956 г.).

Основные характеристики ускорителя

Описываемый ускоритель, так же как и все действующие и строящиеся ускорители протонов на энергию больше 1000 Мэв, является синхрофазотроном.

Как известно, синхрофазотронный метод ускорения характеризуется использованием принципа «автофазировки» для частиц, движущихся в переменном магнитном поле по постоянной (или почти постоянной) равновесной орбите. Частота ускоряющего напряжения должна изменяться пропорционально скорости протонов. Движение частиц происходит в камере, расположенной между полюсами кольцевого магнита. Магнит состоит из четырех квадрантов (средний радиус 28 м), разделенных восьмиметровыми прямолинейными промежутками. В одном из этих промежутков помещена система ввода частиц, а в двух других — ускоряющие электроды. Один из прямолинейных промежутков используется для вывода частиц.

Протоны предварительно ускоряются в линейном ускорителе до энергии 8,5—9 Мэв, затем проходят 10 м по прямолинейному пути. На прямолинейном пути осуществляется фокусировка пучка двойным магнитным корректором, магнитной линзой и юстировочными конденсаторами. Затем пучок частиц поворачивается на 75° в поворотном фокусирующем магните и вводится в камеру синхрофазотрона. Вакуумная камера имеет апертуру 200×36 см. Общая длина камеры 204 м.

Расчет показывает, что необходима юстировка положения пучка при входе в камеру с точностью до нескольких угловых минут. Эта юстировка осуществляется электростатическим инфлектором, состоящим из пяти поворотных пластин, к которым подведено постоянное стабилизированное напряжение, регулируемое до 100 кВ. Частицы инжектируются в камеру, когда напряженность магнитного поля в зазоре магнита равняется 150 э. Ускорение заканчивается при значении напряженности магнитного поля 13 000 э. Частицы получают приращение энергии в двух пролетных трубках, расположенных в диаметрально противоположных прямолинейных промежутках. Эффективная амплитуда ускоряющего напряжения может изменяться от 3 до 8 кВ. Цикл ускорения длится около 3,3 сек. Период повторения циклов 12 сек.

В конце цикла ускорения пучок может быть направлен на специальные мишени и использован либо в непосредственной близости от электромагнита ускорителя (у прямолинейных участков и около окон в ярме магнита), или в специальном павильоне.

Техническое задание на основные параметры ускорителя было разработано на основе теории синхрофазотрона, развитой в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР [3]. Эта теория позволила установить допуски на основные параметры ускорителя, выяснить причины возможных потерь частиц в процессе ускорения, выбрать оптимальные условия для инжекции, необходимую конфигурацию магнитного поля и решить много других вопросов, важных для проектирования, сооружения и пуска ускорителя. Ряд сложных задач, связанных с инжекцией и потерями частиц из-за резонансного увеличения амплитуды колебаний, был решен на действующей модели, дававшей пучок протонов с энергией до 180 Мэв [2], [3].

Разработанная нами теория синхрофазотрона широко известна в нашей стране и используется во многих лабораториях при расчетах всех новых ускорителей. Мы остановимся лишь на качественном описании движения частиц, которое следует из развитой нами точной теории.

Движение частиц в циклических ускорителях может быть разложено на три составляющие:

- 1) Движение по постоянной равновесной орбите с резонансной частотой обращения. Двигаясь по равновесной орбите, частица все время находилась бы в резонансе с частотой ускоряющего поля.

- 2) Медленные колебания около равновесной орбиты, связанные с отклонением частицы от точного резонанса. Эти колебания называются радиально-фазовыми, так как отклонения от резонанса приводят к изменению фазы высокочастотного поля, ускоряющего частицы при каждом их прохождении через зазор. Период фазовых колебаний изменяется от 500 до 1500 мксек, что от 100 до 2000 раз больше периода обращения. Обычно говорят, что, отклоняясь от равновесной орбиты, частица двигается по мгновенным орбитам, колеблющимся около равновесной.

3) Быстрые колебания около мгновенной орбиты с периодом от 7 до 2 *мксек*.

Поэтому движение частиц в синхрофазотроне выглядит следующим образом. Мгновенная орбита совершает медленные колебания около неподвижной равновесной орбиты, проходящей через центр ускорительной камеры. Частицы совершают быстрые колебания около мгновенной орбиты.

Для того чтобы равновесная орбита оставалась постоянной, изменения напряженности магнитного поля и частоты ускоряющего поля должны быть синхронизованы. Ошибка в частоте Δf смещает орбиту по радиусу. Для характеристики нашего ускорителя можно указать, что если относительная ошибка в частоте равна $\pm 0,1\%$, то смещения частиц по радиусу могут достигать $\Delta r = \pm 6$ см.

Радиально-фазовые колебания обычно затухают в процессе ускорения, и в нашем случае их амплитуда изменяется от 50 см в начале ускорения до 1 см в конце. Трудности запуска синхрофазотрона связаны, в частности, и с тем, что амплитуды радиальных колебаний из-за всякого рода возмущений могут возрасти так, что в результате будет происходить потеря частиц из пучка.

В синхрофазотроне приходится применять особые меры по подавлению гармоник магнитного поля, возникающих из-за пульсации выпрямленного тока, питающего обмотку магнита. Это обусловлено тем, что частота радиально-фазовых колебаний в процессе ускорения непрерывно меняется и может оказаться в резонансе с указанными возмущениями. В частности, резонанс со второй гармоникой (1200 *гц*) может привести к особенно значительным потерям частиц. Потеря частиц может происходить не только из-за пульсации напряженности магнитного поля, но также при колебаниях амплитуды или частоты ускоряющего электрического поля. Особенно опасна, как показывают теория и опыт, шумовая раскачка колебаний из-за относительно большого времени ускорения. Известно, что шумовая раскачка пропорциональна $\sqrt{t}$, где t —время ускорения.

Большое значение для установления допусков имеет теория свободных колебаний и расчет влияния всевозможных возмущений на движение частиц. Нами были исследованы простые и параметрические резонансы, рассчитана связь между радиальными и верти-

кальными колебаниями, учтено влияние нелинейности, в результате чего была выделена некоторая эффективная область, свободная от резонансов, где $0,55 < n < 0,75$.

С другой стороны, резонансы со свободными колебаниями, весьма опасные в процессе ускорения, в некоторых случаях могут быть использованы для улучшения эффективности инъекции. Поэтому область резонансных значений n у края магнита может быть использована при инъекции, в связи с чем большое значение имеет возможность изменять конфигурацию магнитного поля с помощью специальных обмоток.

К основным научно-техническим проблемам, решение которых оказалось необходимым при сооружении ускорителя, относятся: создание электромагнита с системой питания, вакуумной камеры с системой откачки, системы высокочастотного ускорения и инжектора с системой ввода частиц. Потребовалось проведение значительной теоретической и экспериментальной работы, имеющей общее значение для сооружения крупных циклических ускорителей. Сюда относятся: разработка методов расчета электромагнитов, методов коррекции и регулирования магнитного поля, разработка теории и схем мощных преобразовательных устройств, разработка методов слежения частоты ускоряющего напряжения за напряженностью магнитного поля, методов усиления высокочастотных колебаний при изменении частоты в широких пределах и др.

Электромагнит и система его питания

Размеры и вес электромагнита, а также мощность его питания резко возрастают с увеличением энергии ускоряемых частиц. При принятой наибольшей величине напряженности магнитного поля, допусков на отклонение магнитных характеристик от заданных и точности слежения частоты ускоряющего напряжения за магнитным полем вес электромагнита растет пропорционально максимальной энергии ускоренных частиц приблизительно в степени 2,5, а запасенная энергия магнитного поля—в третьей степени. Поэтому сооружение синхрофазотронов обычного типа на большие энергии частиц наталкивается прежде всего на инженерные и экономические трудности, связанные с соз-

данлем крупных электромагнитов и систем их питания.

Уменьшение размеров и веса электромагнита, а также мощности системы питания может быть осуществлено только за счет увеличения максимальной напряженности магнитного поля и принятия более жестких допусков на точность изготовления и поддержания режима работы всего оборудования. Значительное увеличение напряженности маг-

Относительно жесткие допуски привели к повышению требований к качеству изготовления и монтажа электромагнита и к разработке специальных методов прецизионной коррекции магнитного поля.

Были предложены, разработаны и осуществлены следующие системы коррекции поля: система размагничивания, устраняющая искажающий эффект остаточного намагничивания, система компенсации динамических



Рис. 1. Общий вид внешней стороны кольцевого электромагнита.

нитного поля сверх принятого нами не даст заметного экономического эффекта, так как при этом, вследствие эффекта насыщения, резко возрастают вес электромагнита и мощность, необходимая для его питания. Кроме того, в этом случае возникают значительные трудности при коррекции магнитного поля. Таким образом уменьшение веса электромагнита и мощности системы питания, являющихся наиболее дорогими элементами оборудования крупного синхрофазотрона, может быть осуществлено лишь за счет уменьшения допусков.

Величины допусков и относительные размеры апертуры ускорителя на 10 БэВ меньше, чем у других аналогичных ускорителей.

искажений магнитного поля, система коррекции положения меднанной плоскости магнитного поля, система регулирования показателя спада магнитного поля, система коррекции азимутальной неоднородности и система расширения рабочей области поля при больших индукциях, компенсирующая влияние эффекта насыщения. Результаты предварительной проверки магнитного поля смонтированного электромагнита показали, что все эти системы коррекции работают удовлетворительно [4], [5].

Каждый из четырех квадрантов электромагнита состоит из 12 блоков. Вес одного блока около 750 т. Общий вид электромагнита изображен на рис. 1 и 2. Наружный диаметр

электромагнита составляет 72 м. Вес электромагнита вместе с обмотками 36 000 т [6].

Для питания электромагнита была применена система с накоплением энергии во вращающихся маховых массах. Преобразование механической энергии в электрическую осуществляется при помощи синхронных машин, непосредственно связанных

ток—12 800 а, максимальное напряжение 11 000 в, количество параллельно работающих агрегатов—4 (рис. 3), количество ионных вентилях-игнитронов—96.

Значительная пиковая мощность установки приводит к необходимости использования большого числа параллельно работающих ионных вентилях. При этом возникает целый

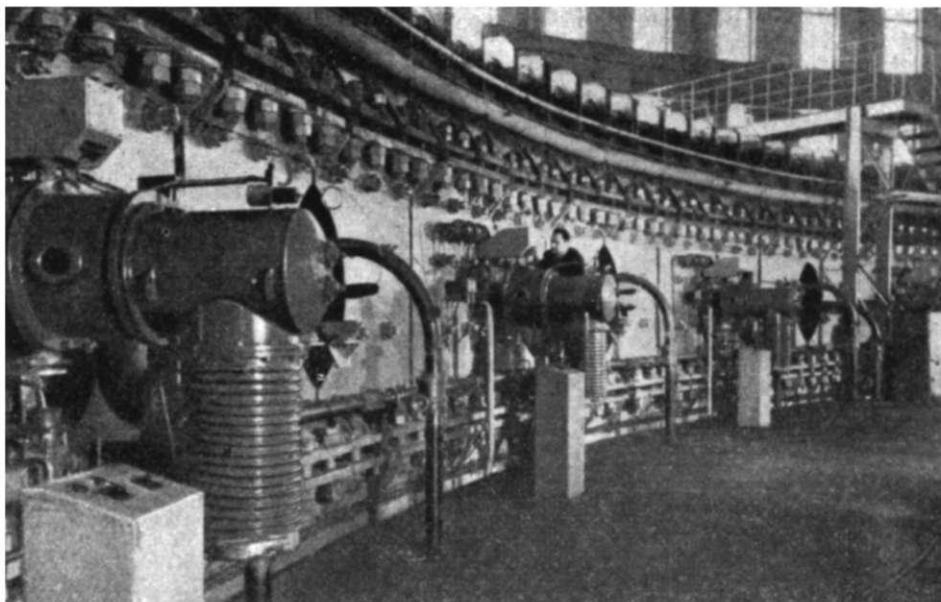


Рис. 2. Общий вид внутренней стороны кольцевого электромагнита.

с ионными вентилями. При этом в течение периода нарастания магнитного поля система питания отдает энергию магнитному полю электромагнита, ионные преобразователи работают в выпрямительном режиме, а синхронные машины—в генераторном режиме. После достижения максимальной напряженности поля в 13 000 э преобразователи переводятся в инверторный режим, и энергия, запасенная в электромагните, возвращается синхронным машинам. Синхронные машины работают в этом случае в режиме двигателей и преобразуют энергию магнитного поля в кинетическую энергию маховых масс. При такой системе электродвигатели потребляют из сети мощность, необходимую только для покрытия потерь в системе.

Система питания характеризуется следующими основными данными: максимальная мощность 140 000 ква, максимальный

ряд проблем, связанных с необходимостью равномерного распределения нагрузки между отдельными вентилями. Требования к возможному уменьшению опасных гармоник магнитного поля приводят к необходимости подводить к обмоткам электромагнита выпрямленное напряжение с весьма малыми пульсациями.

Эта задача решена путем применения синхронных машин с двумя системами трехфазных обмоток на каждой машине, сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 30 электрических градусов. Каждая система обмоток питает мостовую преобразовательную схему [7]. Для дополнительного уменьшения величины пульсаций магнитного поля разработана специальная система, вытесняющая пульсирующую часть магнитного потока из рабочего зазора в область поля рассеяния.

При разработке схемы питания серьезное внимание было обращено на уменьшение влияния случайных нарушений рабочего режима. Эти случайные нарушения (обратное зажигание, пропуск фазы и т. д.) особенно существенны в инверторном режиме, так как они приводят к потере устойчивости

щей из внутренней высоковакуумной и наружной форвакуумной камер. Это дало возможность выполнить горизонтальные поверхности высоковакуумной камеры, пронизываемые магнитным потоком, из тонких листов нержавеющей стали толщиной 0,15 мм. Эти листы разделены на изолированные

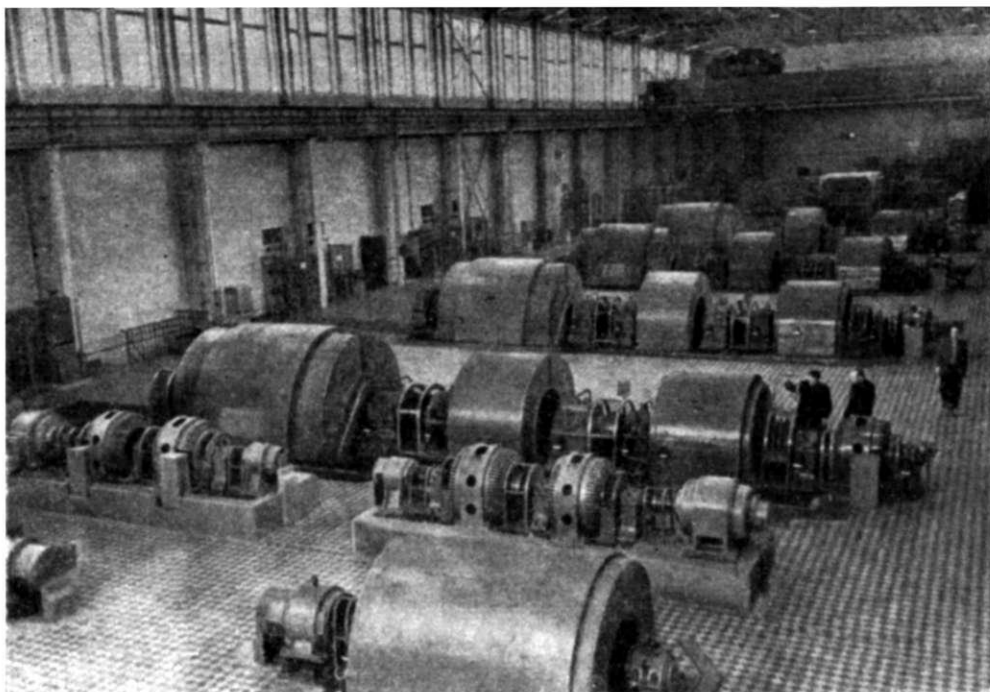


Рис. 3. Общий вид зала синхронных электрических машин.

системы. Необходимо было принимать специальные меры по искусственному введению схемы в устойчивый режим после исчезновения этих случайных нарушений.

На рис. 4 изображен общий вид зала инверторных преобразователей.

Вакуумная система

Основные проблемы создания вакуумной камеры синхрофазотрона связаны с ее значительными размерами (объем камеры составляет около 160 м^3), высоким вакуумом — порядка $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ — и наличием переменного магнитного поля, исключавшего применение в конструкции камеры массивных металлических элементов.

Решение задачи было найдено на основе применения двухкамерной системы, состоя-

щей из внутренней высоковакуумной и наружной форвакуумной камер. Это дало возможность выполнить горизонтальные поверхности высоковакуумной камеры, пронизываемые магнитным потоком, из тонких листов нержавеющей стали толщиной 0,15 мм. Эти листы разделены на изолированные

секции таких размеров, при которых искажения магнитного поля, вызванные вихревыми токами, оказываются допустимыми. Горизонтальные части высоковакуумной камеры крепятся непосредственно к полюсным башмакам электромагнита. Полюсные башмаки электромагнита одновременно являются элементами конструкции форвакуумной камеры и уплотнены при помощи листов из текстолита и резины. Боковые стенки этой камеры выполнены из дюралюминия и обтянуты листовой резиной. Обычно в форвакуумной камере поддерживается давление порядка 1 мм рт. ст. Во избежание механических повреждений высоковакуумной камеры при аварийном увеличении давления в форвакуумной камере используется система защиты с затворами и диафрагмами [8].

Откачка высоковакуумной камеры производится 56 паромасляными насосами. Производительность каждого насоса 5000 л/сек. [9]. Высоковакуумная система снабжена ловушками, соединенными с системой централизованной подачи жидкого азота.

Откачка форвакуумной камеры производится 16 насосами типа ВН-6.

кой которых являются ускорительные элементы.

В качестве ускорительных элементов впервые было предложено применить короткие, выполненные в виде пролетных трубок электроды, являющиеся наиболее эффективными для синхрофазотронов на большие энергии. Эта система ускорения была проверена на

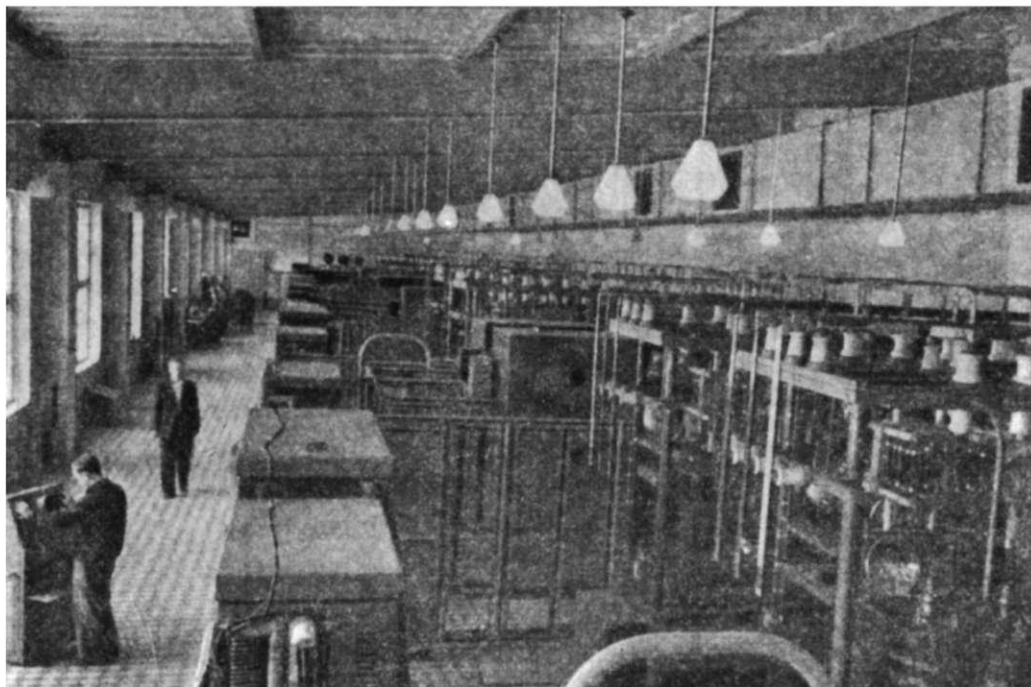


Рис. 4. Общий вид зала игнитронных преобразователей.

Высокочастотная система и управление процессами инжекции и ускорения частиц

Создание высокочастотной системы ускорения протонов и системы управления процессами инжекции и ускорения частиц потребовало решения ряда новых проблем в области радиотехники и электроники. Прежде всего следовало разработать радиотехническую систему, которая создает изменяющееся в широких пределах по частоте электрическое поле, обеспечивающее необходимый прирост энергии частиц. Была принята система, состоящая из частотно-модулированного задающего генератора и широкополосных высокочастотных усилителей, нагруз-

модели синхрофазотрона на 180 Мэв и принята для синхрофазотрона на 10 Бэв.

Необходимо было создать задающий генератор, частота которого изменялась бы в течение цикла ускорения от 0,182 до 1,5 Мгц и следовала за напряженностью магнитного поля в зазоре электромагнита в соответствии с требуемой функциональной связью с точностью, лучшей чем $1 \cdot 10^{-3}$. При разработке задающего генератора проводилось сравнение различных методов широкодиапазонной модуляции частоты. Был принят метод стабилизации модуляционной характеристики генератора при помощи отрицательной обратной связи через прецизионный частотный детектор. Разработанный задающий генератор имеет диапазон частот 0,15—1,5 Мгц.

Стабильность модуляционной характеристики генератора, проверенная в течение более 100 час., оказалась лучше чем $\pm 7 \cdot 10^{-4}$.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что относительный уровень паразитной модуляции частоты в полосе 600—2000 гц на частотах, совпадающих с гармониками питающей сети, меньше $5 \cdot 10^{-7}$, а спектральная плотность шумовой модуляции частоты в той же полосе частот меньше 0,05 гц²/гц.

Для управления частотой задающего генератора используется напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита. Были исследованы два варианта управления частотой задающего генератора. В первом варианте применен расположенный в безопасном от излучений помещении вспомогательный электромагнит, через обмотку которого проходит ток возбуждения основного электромагнита. В зазоре вспомогательного электромагнита помещена катушка контура генератора, имеющая ферритовый сердечник. Изменение напряженности магнитного поля приводит к изменению магнитной проницаемости сердечника, а следовательно, и частоты колебаний задающего генератора. Во втором варианте используется интеграторный датчик магнитного поля, состоящий из индукционной катушки, расположенной в зазоре главного или вспомогательного электромагнита и электронного интегратора, выходное напряжение которого используется для управления частотой задающего генератора. В обоих вариантах подбор соответствия величин частоты ускоряющего поля и напряженности магнитного поля с точностью, лучшей чем $\pm 10^{-3}$, осуществляется путем применения функционального преобразования сигнала, используемого для управления частотой задающего генератора [10], [11].

Усиление частотно-модулированных колебаний задающего генератора до 20 000 в производится многокаскадными широкополосными усилителями мощностью до 200 квт. Такой способ усиления применен во всех каскадах, кроме оконечного, определяющего основное потребление электроэнергии от сети питания. Оконечный каскад усилителя выполнен по схеме резонансного усиления.

В качестве колебательного контура оконечного каскада применена система, емкость которой (1500 пф) определяется пролетной

трубкой, а индуктивность—катушкой с ферритовым сердечником. Для осуществления автоматической настройки колебательного контура в резонанс с частотой усиливаемых колебаний магнитная проницаемость сердечника катушки изменяется при помощи подмагничивания примерно в 100 раз. Ток, проходящий через обмотку подмагничивания, регулируется автоматически изменением напряжения, получаемого от датчика, реагирующего на расстройку колебательного контура относительно частоты ускоряющего электрического поля.

Оказалось целесообразным применить блочную систему включения высокочастотных усилителей, так как напряжения, подведенные к обоим ускоряющим электродам, суммируются. Благодаря этому удалось при двух ускоряющих электродах, расположенных в противоположных прямолинейных промежутках, снизить в два раза колебательную мощность, а также уменьшить вдвое вес феррита (до 2 т) по сравнению со случаем, когда ускоряющий электрод находится только в одном промежутке.

При разработке индуктивности с ферритовым сердечником, включенной в контур выходного каскада высокочастотного усилителя, оказалось необходимым детально изучить поведение ферритов в сильных высокочастотных полях.

В результате проведенных исследований была принята конструкция переменной индуктивности в виде отрезка коаксиальной линии, частично заполненной ферритом. Эта конструкция была испытана и затем применена в контурах оконечных каскадов высокочастотных усилителей [12]—[14].

Решение задачи получения сигналов для включения и выключения инжектора, для включения высокочастотного ускоряющего напряжения и т. д. потребовало разработки датчиков магнитного поля нового типа.

Требуемая точность включения системы инжекции и ускоряющего высокочастотного поля в синхрофазотроне равна ± 10 мксек, что соответствует относительной точности напряженности магнитного поля $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ и абсолютной точности $\pm 4 \cdot 10^{-2}$ э. Для индикации мгновенных значений напряженности магнитного поля применена трансформация изменения напряженности магнитного поля в изменение частоты электрических колебаний. Из этих колебаний формируются им-

пульсы, жестко привязанные к мгновенным значениям изменяющейся частоты, а следовательно, и к напряженности магнитного поля. В результате были получены импульсные сигналы управления, обеспечивающие точность включения системы инжекции и ускоряющего высокочастотного поля, лучше чем $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ [15].

Для прецизионных измерений мгновенной частоты ускоряющего высокочастотного напряжения были изучены и разработаны новые методы измерений, позволяющие получить относительную точность, лучшую чем $5 \cdot 10^{-4}$.

Применение в синхрофазотроне электромагнита с изменяющимся во времени магнитным полем потребовало также разработки новых методов динамических измерений напряженности магнитного поля. Оказалось необходимым создать специальную аппаратуру для прецизионных измерений мгновенных значений напряженности магнитного по-

ля от 150 э до 13 000 э с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$. Для этой цели наиболее подходящим оказался метод, использующий явление ядерного магнитного резонанса.

В настоящей статье нет возможности остановиться на других важных элементах установки: линейном ускорителе, системе ввода, электронно-оптической системе и ряде других.

В заключение необходимо отметить, что в сооружении ускорителя участвовали большие коллективы ряда научно-исследовательских институтов и заводов министерств электротехнической и радиотехнической промышленности, а также ряд проектных, строительных и монтажных организаций, вложившие много труда в эту сложную установку. В настоящее время на синхрофазотроне проходит период наладочных работ, и в ближайшее время мы надеемся приступить к комплексному запуску этого ускорителя. Поступила в редакцию 29 V 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер, А. А. Коломенский, В. А. Петухов, М. С. Рабинович, Физические основы сооружения синхрофазотрона на 10 Бэв (Доклад на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий, Москва, 1956).
2. Л. П. Зиновьев, В. А. Петухов, Экспериментальные исследования на модели большого ускорителя частиц на энергию протонов 10 Бэв. Там же.
3. И. С. Данилкин, М. С. Рабинович, Некоторые вопросы теории циклических резонансных ускорителей в связи с экспериментами на синхрофазотроне на 180 Мэв. Там же.
4. А. А. Журавлев, Е. Г. Комар, И. А. Мозалевский, Н. А. Монозон, А. М. Столов, Магнитные характеристики синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
5. М. Д. Весселов, А. А. Журавлев, И. А. Мозалевский, Э. А. Мяз, А. М. Столов, С. В. Федук, Методы и результаты экспериментального исследования магнитного поля синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
6. Е. Г. Комар, Н. А. Монозон, Н. С. Стрельцов, Г. М. Федотов, Некоторые особенности конструкций электромагнита синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
7. М. А. Гашев, Е. Г. Комар, Н. А. Монозон, А. М. Столов, Ф. М. Спевалова, Система питания электромагнита синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
8. Е. Г. Комар, Н. Ф. Малышев, Я. Л. Михелис, А. В. Попкович, Вакуумная камера синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
9. С. А. Векшинский, Вакуумные откачные агрегаты для ускорителей. Там же.
10. А. Л. Минц, М. С. Рубчинский, М. М. Вейсбейн, Ф. А. Водопьянов, А. А. Кузьмин, В. А. Уваров, Системы связи частоты ускоряющего поля и напряженности магнитного поля в синхрофазотронах. Там же.
11. Ф. А. Водопьянов, Задающий генератор в системе связи f и H синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
12. Ю. М. Лебедев-Красин, Ускоряющие элементы синхрофазотрона и основные вопросы их питания напряжением высокой частоты. Там же.
13. И. Х. Невяжский, Г. М. Драбкин, В. Ф. Трубецкой, А. С. Темкин, Применение индуктивностей с ферритовыми сердечниками в контурах мощного каскада синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
14. Л. М. Гуревич, Б. М. Гутнер, Г. М. Драбкин, Н. К. Каминский, Автоматическая настройка контура оконечного каскада высокочастотного генератора синхрофазотрона на 10 Бэв. Там же.
15. А. Л. Минц, С. М. Рубчинский, М. М. Вейсбейн, А. А. Васильев, Системы управления процессами инжекции и ускорения частиц в синхрофазотронах. Там же.