


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Декан ФТФ


В.И. Бойко
« 25 » ноября 2008 г.

Ю.М. Степанов

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Электрофизические установки и ускорители»
для магистрантов, обучающихся по магистерской программе
«Физика ускорителей» направления 010700 «Физика»

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 532.124.18(07)

ББК 22.383я73

С79

Степанов Ю.М.

С79 Ускорители электронов: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электрофизические установки и ускорители» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе «Физика ускорителей» направления 010700 «Физика» / Ю.М. Степанов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 116 с.

ISBN 5-98298-389-6

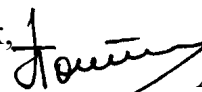
УДК 532.124.18(07)

ББК 22.383я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
прикладной физики ФТФ
« 31 » мая 2007 г.

Заведующий кафедрой ПФ

доктор физико-математических наук,
профессор



А.П. Потылицын

Председатель учебно-методической
комиссии



В.Д. Каратаев

Рецензент

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
НИИ онкологии ТНЦ СО РАМН

В.А. Лисин

ISBN 5-98298-389-6

© Степанов Ю.М., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

1. ЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

1.1. Принцип действия линейного резонансного ускорителя электронов

Существует два типа линейных резонансных ускорителей электронов – на стоячей и на бегущей волне.

Структура ускорителя электронов со стоячей ВЧ-волной аналогична применяемой для ускорения протонов. В разное время рядом фирм и исследовательских лабораторий было изготовлено несколько электронных ускорителей с полыми резонаторами и дрейфовыми трубками. Они были построены на сравнительно низкую энергию до 5 МэВ в одно- и двух-резонаторном исполнении. В настоящее время выпускаются ускорители на еще меньшие энергии, но большую интенсивность пучка. В них применено ускорение в ускоряющем промежутке одного резонатора. Были попытки использовать полые резонаторы для ускорения очень короткоимпульсных электронных пучков на токи в несколько ампер. Здесь при ограниченной средней мощности питающего ВЧ – генератора в резонаторе больших размеров с диаметром в несколько метров и при соответственно большой длине волны удастся накопить большую энергию, которая при быстрой передаче ее пучку позволяет ускорить значительные токи.

Для ускорения электронов на большие энергии резонаторные ускорители со стоячей волной не применяются. Электроны очень быстро набирают скорость, близкую к скорости света. Шаг расстановки трубок становится близким к λ . Средняя напряженность ускоряющего поля в системах с дрейфовыми трубками мала и колеблется в пределах $(1 \div 3) \text{ МВ/м}$.

В ускорителях электронов на высокие энергии (более 5 МэВ) для ускорения используется электромагнитная волна, бегущая вдоль волновода. Здесь в отличие от систем с дрейфовыми трубками частица попадает в зону действия ускоряющего поля не дискретно в промежутках между трубками, а непрерывно находится в постоянном по отношению к ней ускоряющем электрическом поле. Для этого необходимо использовать волны с вектором электрического поля вдоль волновода и обеспечить равенство скорости частицы и фазовой скорости электромагнитной волны. Труба, выполненная из проводящего материала (обычно из меди), служит волноводом. Электромагнитная волна, возбужденная в какой-то точке трубы, распространяется далее вдоль ее длины, постепенно затухая из-за потерь в стенках. Длина бегущей волны близка к диаметру сечения волновода. Для электронных ускорителей характерна высокая скорость уже в самом начале ускорения. При W_e несколько МэВ $v_e \approx c$. Это позволяет

применять волноводы с бегущей волной. Если заставить электрон двигаться в фазе с волной, на него будет действовать электрическое поле волны, ускоряя его. Используются электромагнитные волны с вектором напряженности электрического поля вдоль волновода (рис. 1.1).

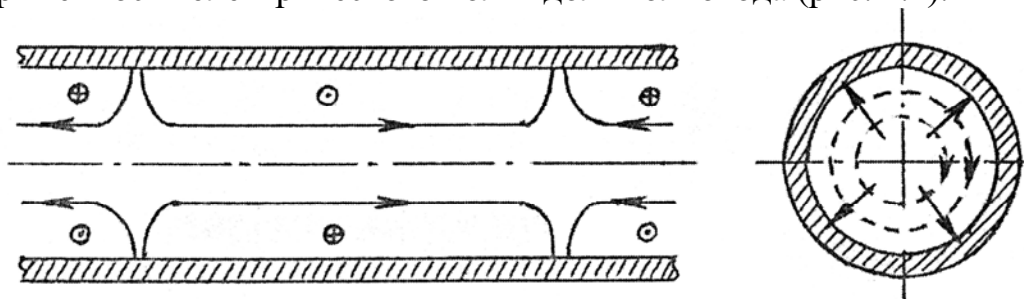


Рис 1.1. E_{01} колебания в гладком волноводе:

— — — — — линии электрического поля; - - - — — — — — линии магнитного поля

Фазовая скорость волны в гладком волноводе $v_\phi > c$. Применяются волноводы, в которых $v_\phi \leq c$. Существуют различные способы замедления волн, но используются только диафрагмированные волноводы. Диафрагма с относительно малыми размерами ($b/a \approx 4 \div 5$) выполняется как одно целое с волноводом (рис. 1.2).

Отдельные ячейки такого волновода можно рассматривать как цепочку одинаковых цилиндрических резонаторов, в каждом из которых возбуждаются колебания Е-типа (т. е. с продольной составляющей электрического поля) со сдвигом фазы между соседними резонаторами. Такую систему сфазированных колебаний можно рассматривать как бегущую волну. Мгновенная характеристика распределения электрического поля в такой системе зависит от величины сдвига фазы колебаний в соседних резонаторах. Такая модель волновода является хорошей иллюстрацией того, что фазовая скорость не связана с переносом энергии вдоль волновода.

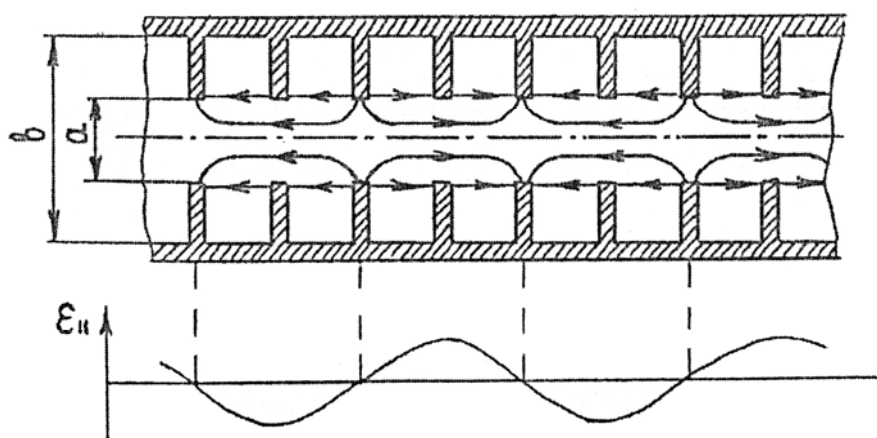


Рис. 1.2. ВЧ электрическое поле в диафрагмированном волноводе

1.1.1. Движение электронов в поле волны с $v_\phi < c$

Электроны, инжектируемые в волновод непрерывным пучком, т. е. с равномерным распределением по фазам, разделяются на две группы (рис. 1.3). Первая группа: электроны с большим отклонением энергии W_e от равновесной W_p ($W_e = W_p$ при $v_e = v_p = v_\phi$) испытывают непрерывное скольжение по фазе относительно волны, либо постоянно отставая от нее (кривая 1), либо опережая (кривая 2). Энергия этих частиц испытывает колебания относительно среднего значения.

Вторая группа: электроны движутся вместе с волной, совершая колебания относительно равновесной фазы (на рис. 1.3 – замкнутые кривые).

Фазовые диаграммы на рис. 1.3 соответствуют случаю, когда фазовая скорость волны постоянна вдоль волновода. Следовательно, $v_p = const$ и $W_p = const$, $\Delta W_p = 0$ и $\varphi_p = \pi$. В этом случае максимально возможный размах колебаний фазы равен 2π — фазовая диаграмма для таких частиц представлена на рис. 1.3 сепаратриссой (кривая 3). В крайних точках сепаратриссы ($\varphi = 0$ и $\varphi = 2\pi$) скорость скольжения по фазе стремиться к нулю. Для частиц с фазами инжекции, близкими к $\varphi_p = \pi$ и энергией, близкой к равновесной, амплитуда и период фазовых колебаний уменьшаются (кривые внутри сепаратриссы).

Итак, энергия электрона не может возрасти неограниченно. Максимально возможная энергия определяется максимальным отклонением энергии от равновесной в процессе фазовых колебаний.

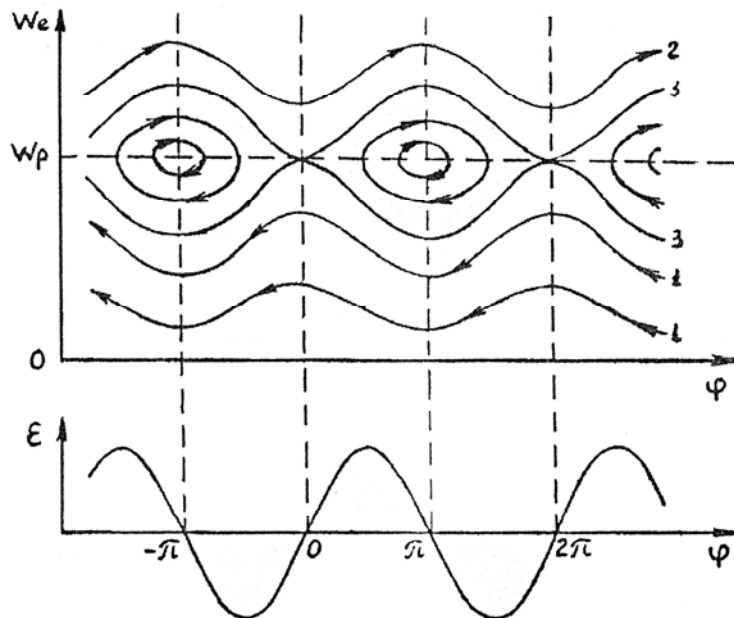


Рис. 1.3. Фазовые траектории в поле медленной волны ($v_\phi < c$) при постоянной вдоль волновода v_ϕ

В волноводе с $v_\phi < c$, но возрастающей вдоль волновода, характер фазового движения частиц остается в принципе таким же. Но так как $v_p = v_\phi$ возрастает, $\Delta W_p > 0$ и, следовательно, $\varphi_p < \pi$. Размах сепаратриссы, разделяющей фазовые траектории захваченных и не захваченных волной электронов уменьшается, и становится невозможным непрерывное опережение волны электронами.

1.1.2. Движение электрона в поле волны с $v_\phi = c$

В этом случае также имеем две группы электронов. Первая группа – электроны, испытывающие непрерывное скольжение по фазе в сторону отставания от волны (фазовые траектории 1, 2 на рис. 1.4). Максимальная энергия в этом случае ограничена, и она тем выше, чем ближе скорость инжектированных электронов к скорости света.

Вторая группа – захваченные волной частицы (фазовые траектории 3, 4 на рис. 1.4). Фаза частиц стремится к конечному значению, когда скорость электрона становится равной скорости света. Автофазировка отсутствует и конечная энергия не ограничена. Чем ближе скорость инжектируемых электронов к скорости света, тем меньше сдвиг фаз они испытывают за время ускорения. При $v_{инж} = c$ сдвиг фазы равен нулю и частица находится в безразличном равновесии с волной.

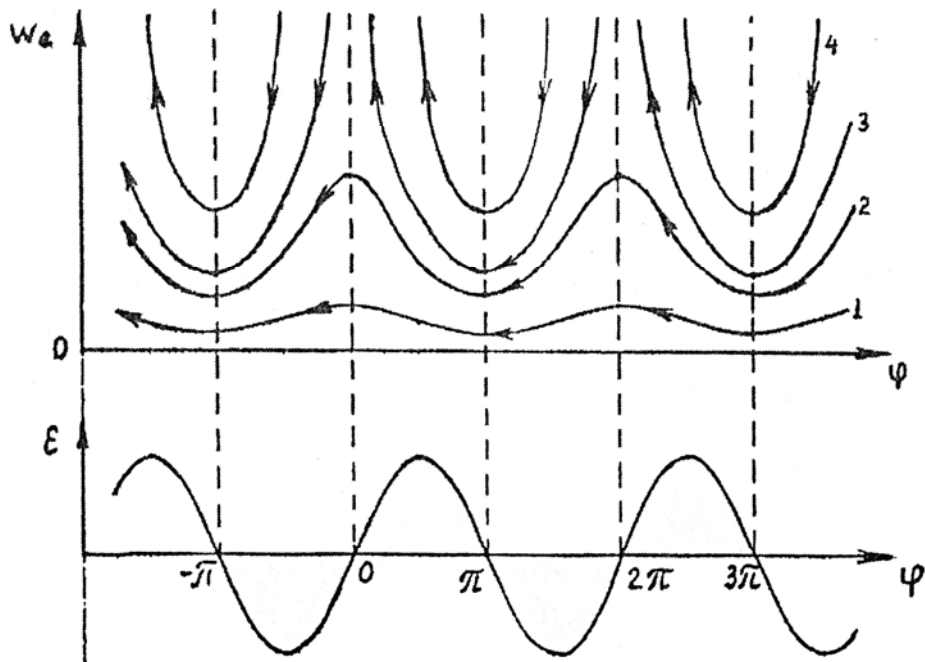


Рис. 1.4. Фазовые траектории при $v_\phi = c$

1.1.3. Группировка частиц в сгустки

Для получения на выходе из ускорителя моноэнергетического пучка электроны перед секциями с $v_\phi = c$ должны быть сгруппированы в сгустки с малым разбросом по фазам и энергии. Ускоритель состоит из двух частей. Первая часть – волноводный группирователь, где частицы ускоряются и группируются в сгустки. Группировка в основном заканчивается при энергии примерно 3 МэВ, где $v_e \approx c$. Вторая часть – секции с $v_\phi = c$. Здесь фазы почти постоянны. Конструктивно эти части могут быть и не разделены, но они обязательны для любого ЛУЭ.

Ускорители на малые энергии состоят практически из одного группирователя, в ЛУЭ на большие энергии группирователь по длине занимает малую часть ускорителя, а большую часть – секции с $v_\phi = c$, каждая из которых запитывается от своего ВЧ – генератора. Предварительная группировка частиц по фазе может производиться без существенного дополнительного ускорения (резонаторный или клистронный способ группировки, использующие принцип скоростной модуляции частиц в резонаторе с последующей группировкой их в пролетном пространстве) или одновременно с ускорением частиц (волноводные группирователи различных видов). Группирователь должен сформировать сгустки, отстоящие друг от друга на расстояние, равное длине ускоряющей волне. Желательно, чтобы после фазовой группировки энергетический разброс частиц в сгустке был также минимальный.

В волноводном группирователе частицы группируются в процессе фазовых колебаний. Механизм группировки иллюстрирует рис. 1.5, где показано фазовое движение электронов в секции волновода с постоянной фазовой скоростью волны $v_\phi < c$, в которую инжектируется непрерывный поток электронов со скоростью, равной фазовой ($W_{инж} = W_p$). Ускорения в этой секции не будет, но все частицы будут совершать фазовые колебания относительно синхронной частицы, находящейся в фазе $\varphi_p = \pi$. Распределение частиц по фазам в начальный момент показаны темными точками ($a - f$). Скорость движения изображающих точек по фазовым траекториям определяется частотой фазовых колебаний. В силу нелинейности фазовых колебаний с увеличением амплитуды частота колебаний уменьшается, стремясь к нулю при приближении к сепаратриссе. Для малых (линейных) фазовых колебаний движение частиц в окрестности равновесной фазы (точки в интервале $c - d$) можно представить как движение точек вращающегося твердого стержня. Из-за нелинейности колебаний крайние участки стержня будут двигаться с

меньшей скоростью, изгибаясь против направления вращения стержня (точки в интервале $a-c$ и $d-f$). Поэтому через время, немногим большее четверти периода фазовых колебаний, фазовые точки расположатся на S – образной пунктирной кривой (точки $a'-f'$). При этом по сравнению с начальным распределением фазовый интервал уменьшается с начального $\Delta\varphi_{нач} = 4,2 \text{ рад}$ до $\Delta\varphi_{кон} = 0,63 \text{ рад}$, но увеличивается разброс по энергиям. На этой длине заканчивается фазовая группировка, так как при дальнейшем движении фазовая ширина сгустка вновь увеличивается.

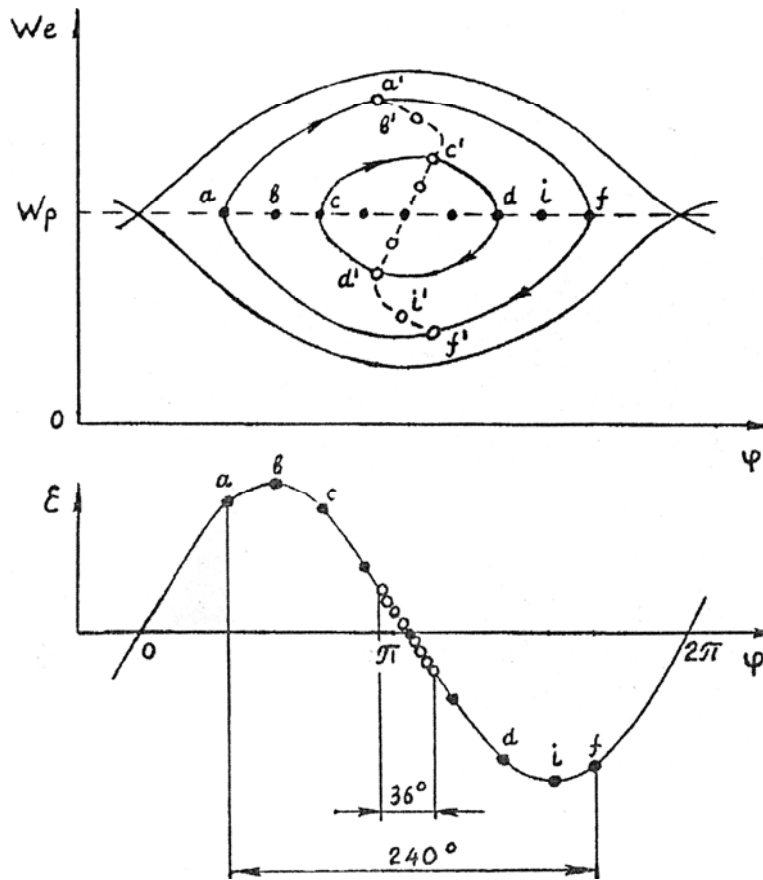


Рис. 1.5. Изменение энергии и фазы при ускорении в секции волновода с постоянной фазовой скоростью при $v_\phi < c$

Физический механизм фазовой группировки в различных волноводных группирователях один и тот же, а результаты зависят от амплитуды волны, скорости инжектируемых частиц и фазовой скорости волны, а также от соотношения между ними. Для примера на рис. 1.6 представлены фазовые кривые при $\beta_\phi = 0,8$, $\beta_{инж} = 0,4$ и большой амплитуде ускоряющей волны. Здесь максимальная группировка имеет место

примерно через половину периода фазовых колебаний: в интервале фаз 0,62 рад сосредоточено 60% частиц.

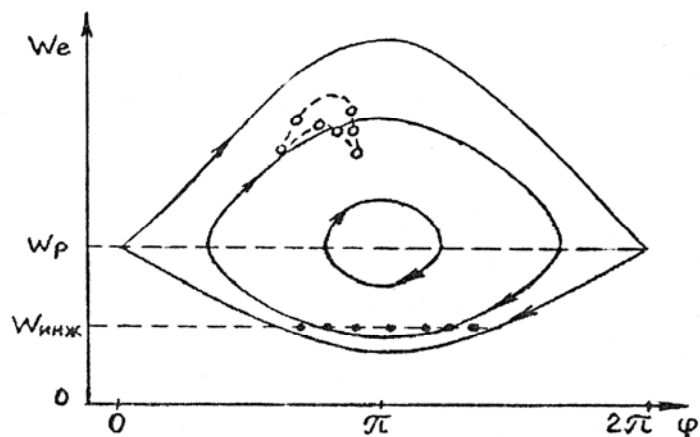


Рис. 1.6. Распределение частиц по фазам при $v_\phi = 0,8$ с и при $v_{инж} = 0,4$ с

В качестве группирующей секции можно использовать секцию с $\beta_\phi = 1$. На рис. 1.7 представлены фазовые распределения до и после группировки в такой секции. Частицы, занимавшие в начале группирователя интервал фаз 1 рад (прямая $a-e$), в конце сгруппируются в фазовом интервале около 0,16 рад (кривая a', b', c').

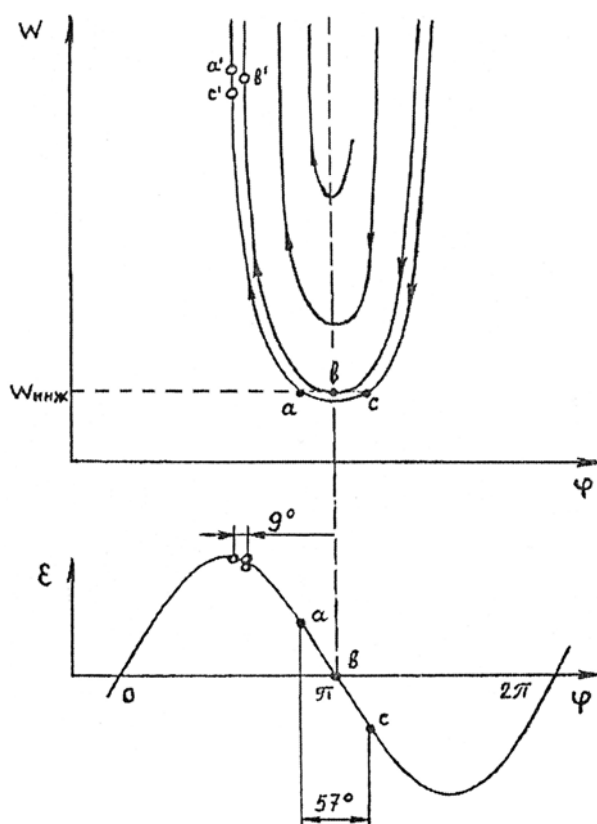


Рис. 1.7. Группировка частиц по фазам в секции волновода с $v_\phi = c$

Наилучшие результаты по группировке можно получить с помощью группирователя, в котором фазовая скорость и амплитуда ускоряющего поля плавно изменяется по длине группирователя. При правильном подборе характера изменения фазовой скорости и амплитуды поля по длине волновода можно обеспечить почти полный захват частиц в режим ускорения при достаточно хорошем для промышленного ускорителя фазовом ($10^\circ - 30^\circ$) и энергетическом (3%–7%) спектрах частиц на выходе. Для получения прецизионного пучка на выходе ускорителя (энергетический разброс около 1% и меньше или фазовый спектр шириной $5^\circ \div 10^\circ$) используют комбинацию различных типов группирователей, включая так называемые чопперы.

ЛУЭ – универсальный источник ионизирующего излучения – может использоваться для получения быстрых электронов, γ – лучей и нейтронов. Если линейный ускоритель применяется как источник тормозного излучения, то ускоренные электроны направляются на мишень, расположенную у выхода ускорителя. Применяются мишени с большим Z . На рис. 1.8 изображена зависимость числа γ – квантов, проходящих через 1 см^2 в секунду в направлении пучка первичных частиц на расстоянии 1 м от золотой мишени на 1 мкА ускоренного тока от энергии фотонов. Число фотонов дается для интервала $\Delta(h\nu) = 0,5 \text{ МэВ}$.

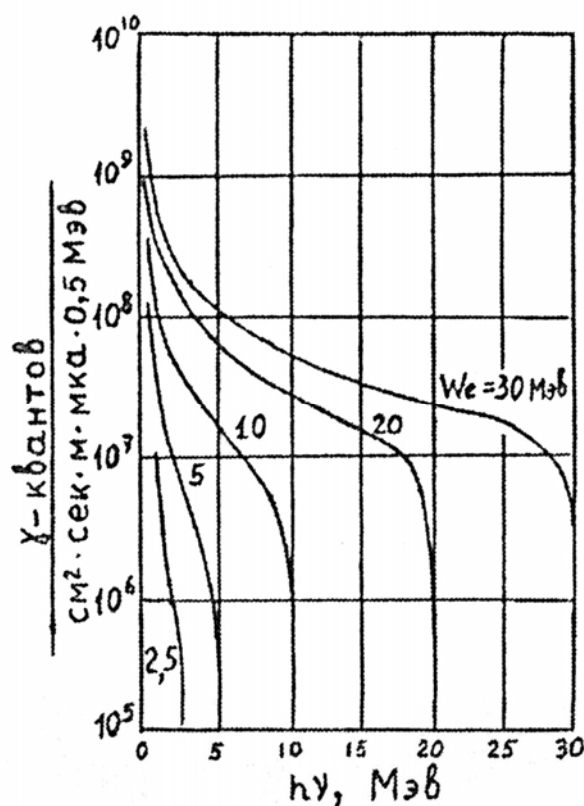


Рис. 1.8. Спектральное распределение плотности потока фотонов тормозного излучения в зависимости от энергии электронов

Если на выходе ускорителя нужно получить нейтроны, поток фотонов тормозного излучения направляется на вторую мишень, где в результате (γ, n) -реакции образуются нейтроны. Выход нейтронов в полном телесном угле из бериллиевой и урановой мишеней в зависимости от энергии электронов показан на рис. 1.9. На рис. 1.10 представлена зависимость выхода нейтронов из равного количества некоторых элементов от максимальной энергии тормозного излучения.

Принципиальные схемы действующих ускорителей мало отличаются друг от друга. На рис. 1.11 приведена схема ускорителя на небольшую энергию. Электромагнитные колебания высокой частоты создаются генератором 14, к выходу которого присоединен тракт, передающий мощность в диафрагмированный волновод 8. Генератор (магнетрон или клистрон) работает в импульсном режиме. Анодное напряжение от модулятора 20 подается через импульсный трансформатор 13 на генератор короткими импульсами определенное число раз в 1 сек. Одновременно напряжение подается и на инжектор 5, вводящий электроны в ускоряющий волновод. Питание катода инжектора осуществляется накальным трансформатором 2. В передающий высокочастотный тракт включены важные для работы ускорителя устройства. К ним относятся: измеритель мощности для дистанционного контроля работы генератора 17, ферритовый изолятор для развязки генератора от нагрузки 16, вакуумное окно 19, отделяющее по вакууму ускоритель от высокочастотного тракта и прозрачное для электромагнитных волн, соединительные волноводы 15, 18. Подводящий волновод соединяется с диафрагмированным волноводом специальным трансформатором, который обеспечивает возбуждение нужного типа волны для ускорения электронов.

Ускорение электронов происходит в вакууме, вследствие чего диафрагмированный волновод выполняется вакуумно-плотным или помещается в вакуумный кожух 10. Вакуум порядка 10^{-6} мм.рт.ст. создается вакуумными насосами предварительного 1 и высокого 3 вакуума. В ускорителе имеются вакуумные задвижки 4, позволяющие отделять друг от друга по вакууму отдельные узлы.

К выходному концу диафрагмированного волновода присоединен второй трансформатор, с помощью которого неизрасходованная высокочастотная мощность отводится в специальное поглощающее устройство 12. За выходным трансформатором устанавливается выпускное окно 11 из тонкой бериллиевой или алюминиевой фольги, через которую быстрые электроны выводятся из ускорителя.

Управляют работой ускорителя дистанционно с помощью пульта 21 из помещения, отделенного специальной стеной, выполняющей роль биологической защиты работающего персонала от вредного излучения установки.

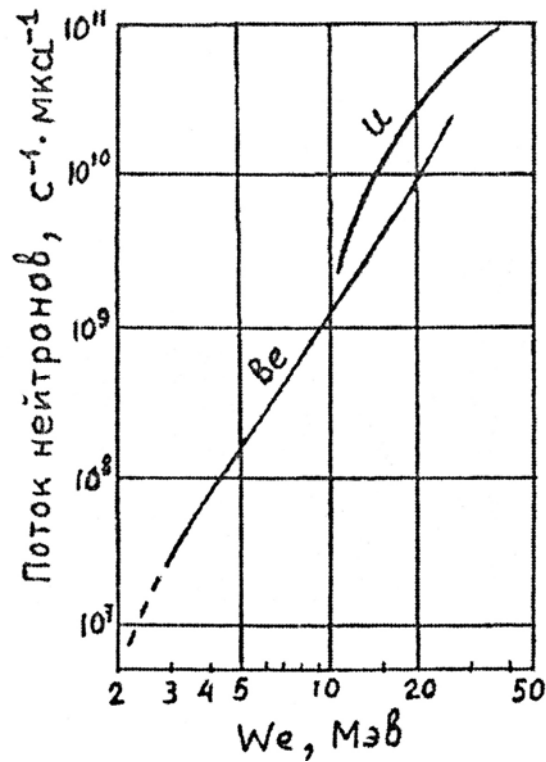


Рис. 1.9. Выход нейтронов из мишени линейного ускорителя в зависимости от энергии электронов

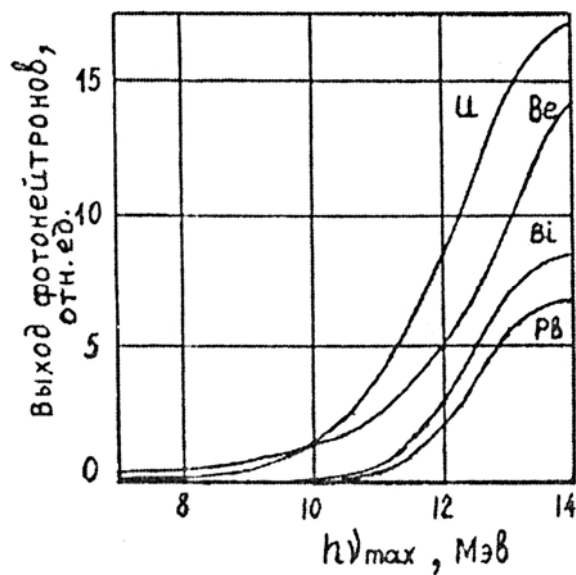


Рис. 1.10. Выход нейтронов из равного количества U, Be, Bi и Pb в зависимости от максимальной энергии электронов

Для фокусирования частиц вдоль волновода расположены фокусирующие катушки 9. С целью предотвращения вредного влияния магнитного поля фокусирующих катушек на прикатодную область инжектора применяют магнитный экран 7. Для дополнительной фокусировки

электронного пучка между инжектором и диафрагмированным волноводом размещают магнитную линзу.

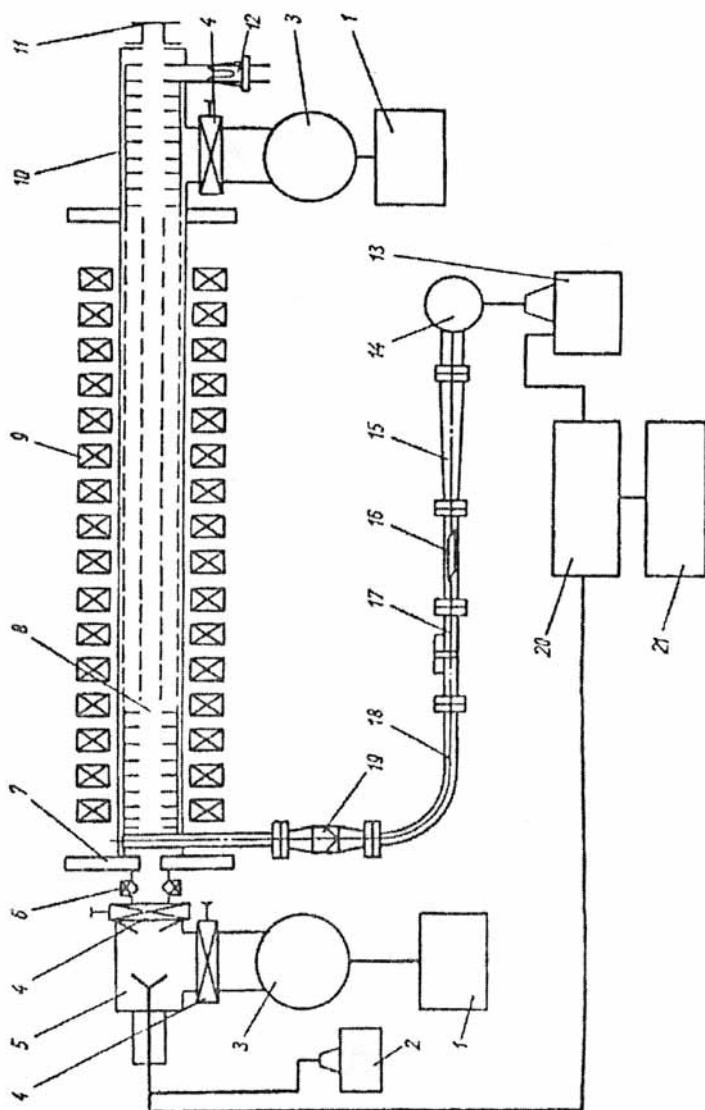


Рис. 11. Схема ускорителя на небольшую энергию:

1 – форвакуумный насос; 2 – трансформатор накала инжектора; 3 – ионно-сорбционные, высоковакуумные насосы; 4 – вакуумные задвижки; 5 – инжектор; 6 – магнитная линза; 7 – магнитный экран; 8 – диафрагмированный волновод; 9 – фокусирующие катушки; 10 – вакуумный кожух; 11 – выходное окно; 12 – поглощающая нагрузка; 13 – импульсный трансформатор; 14 – магнетрон; 15 – соединительный волновод; 16 – ферритовый изолятор; 17 – направленный ответвитель; 18 – волноводный изгиб; 19 – вакуумное окно; 20 – модулятор; 21 – пульт управления

1.2. Ускоритель ЭЛУ-4

1.2.1. Компоновка ускорителя

Ускоряющий волновод выполнен вакуумно-плотным и с помощью специальных опор горизонтально закреплен на станине. Внутри волновода установлены диафрагмы. На волноводе размещены фокусирующие катушки, перед которыми установлен магнитный экран из мягкой стали. Электроны вводятся из инжектора, помещенного непосредственно за магнитным экраном. Цепь накала инжектора питается трансформатором. Инжектор и накальный трансформатор защищены колпаком из органического стекла для предотвращения прикосновения к высоковольтным электродам. Для отделения высоковакуумной части ускорителя от форвакуумной служит вакуумная задвижка. Выпускное окно, через которое ускоренный пучок выходит из ускорителя, помещено на вакуумном коллекторе. В станине расположен подводящий высокочастотную мощность прямоугольный волновод, а на ее наружной стенке находятся вентили и сигнальные лампочки системы охлаждения. Внутри стоек станины укреплены гидравлические реле системы охлаждения, промежуточные коллекторы и трубы подводки воды, а на станине расположена разводка системы охлаждения.

Электрическая схема ускорителя и пульта содержит три группы цепей: силовые, управления и сигнализации. Элементы этих цепей смонтированы частично на ускорителе и модуляторе (главным образом силовые), частично в пульте (цепи управления и сигнализации). Концы этих цепей на ускорителе и пульте выведены на клеммные доски, которые связаны между собой системой кабелей.

Высокочастотный генератор и модулятор к нему расположены в отдельном помещении. Подача высокочастотной мощности осуществляется по волноводу.

Управляют работой ускорителя с пульта. На пульте управления сосредоточены кнопки включения и выключения узлов ускорителя, а также контрольные приборы и устройства, позволяющие наблюдать за работой установки и ее узлов и регулировать режим работы отдельных блоков.

Ускоритель является мощным источником излучения, он размещен в специальном помещении, оборудованном биологической защитой. Все производственные площади, в том числе и пультовая, защищены от излучения толстыми бетонными стенами, и уровень радиации в них не превышает предельно допустимого.

Так как в результате воздействия ионизирующего излучения ускорителя на воздух образуются окислы азота и озон, помещение ускорительной лаборатории оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией.

1.2.2. ВЧ – тракт

Высокочастотный модулятор 20 (см. рис. 1.11), дающий импульсы длительностью (2,5–3) мкс с частотой повторения примерно 200 Гц, запускается с пульта управления. Отрицательный импульс напряжения около 50 кВ от модулятора подается на катод инжектора 5. Так как анод инжектора расположен на заземленном корпусе ускорителя, то в течение длительности импульсов модулятора электроны инжектируются в ускоритель. Катод инжектора питается от накального трансформатора 2, вторичная обмотка которого должна быть изолирована от первичной на соответствующее напряжение. Одновременно то же самое напряжение подается на катод магнетрона 14 через импульсный трансформатор 13. Обычно магнетроны с мощностью (2–10) МВт в импульсе имеют вывод в виде цилиндрического волновода, работающего на H_{11} – волне и обеспечивающего высокую электрическую прочность. Передавать ВЧ – мощность в цилиндрическом волноводе неудобно из-за возможного вращения плоскости поляризации волны за счет неточности изготовления волновода, поэтому более удобен для передачи мощности прямоугольный волновод с фиксированной плоскостью поляризации. Кроме того, в прямоугольном волноводе проще изготавливать различные элементы ВЧ – тракта и делать изгибы. Чтобы перейти от цилиндрического волновода к прямоугольному, в тракте применяют специальный переходник – соединительный волновод 15. Для уменьшения влияния отраженных волн на работу магнетрона в ВЧ – тракте располагают ферритовый изолятор 16. Направленным отверстием 17 можно извлечь часть мощности из ВЧ – тракта для измерения уровня мощности и частоты магнетрона в процессе работы ускорителя. Далее в тракте располагают волноводный изгиб 18, в котором направление потока ВЧ – энергии изменяется на 90° . Вся упомянутая выше часть ВЧ – тракта работает при атмосферном давлении при уровне мощности магнетрона (1,5–2) МВт. При больших мощностях требуется усилить электрическую прочность тракта, для чего в него нагнетают чаще всего воздух под давлением, обычно не превышающего (3–4) атм.

1.2.3. Волновод

Взаимодействие электронов с электромагнитной волной происходит в ускоряющем волноводе, где электроны группируются в сгустки и ускоряются до заданной энергии.

Как видно из рис. 1.11, в ускорителе с бегущей волной мощность от генератора через ВЧ – тракт подается в ускоряющую систему, а оставшаяся неиспользованная мощность поглощается в нагрузке, соединенной с ускоряющей системой ВЧ -трактом. Между ВЧ – трактом и ускоряющим волноводом в начале ускорителя и в конце его расположены устройства для преобразования полей, так называемые трансформаторы типа волны. Так как типы волн в ВЧ – тракте и ускоряющем волноводе различны (обычно H_{10} в прямоугольном волноводе ВЧ – тракта и E_{01} в ускоряющем волноводе), то различны и зависимости волнового сопротивления этих элементов от частоты. Поэтому с помощью возбуждающего устройства можно согласовать тракт с ускоряющим волноводом, т. е. обеспечить полное прохождение мощности через систему лишь в одной точке, соответствующей рабочей частоте. В окрестностях ее в зависимости от согласующего устройства возникают большее или меньшее отражения мощности от входного и выходного согласующих устройств.

Если ускоритель с бегущей волной питается от усилителя мощности, то частота генерируемых колебаний и ее стабильность определяются задающим генератором, возбуждающим усилитель. Тогда при идеальном согласовании на рабочей частоте отражений от согласующих устройств нет, и усилитель мощности работает на согласованную нагрузку, т. е. без отраженных волн. Если при этих условиях увеличить ток ускоряемых частиц, то возрастает доля ВЧ-мощности, передаваемая пучку, и соответственно уменьшается доля, поглощенная в нагрузке. Энергия ускоренных частиц падает, но возрастает КПД ускорителя, а максимум КПД для данного ускорителя, очевидно, будет достигнута, когда мощность, поступающая в нагрузку, будет равна нулю. Изменение ускоренного тока здесь не влияет на режим согласования генератора (или усилителя) с нагрузкой на рабочей частоте.

При возбуждении ускоряющей системы с бегущей волной от автогенератора ситуация изменяется. Здесь в процессе установления частоты при переходном режиме очень существенна нагрузка и важно не только согласование в рабочей точке, но и определенная зависимость входного сопротивления тракта от частоты, которая позволила бы автогенератору выйти на номинальный режим с частотой, равной расчетной, и с соответствующей мощностью. Простое решение вопроса согласо-

ния генератора с нагрузкой – включение в ВЧ-тракт между генератором и ускоряющим волноводом развязки (типа изолятора или циркулятора). Однако часто это бывает не самым оптимальным вариантом либо из-за увеличения общих габаритов ускорителя, либо из-за нежелательности дополнительного поглощения мощности в развязывающем элементе. Именно поэтому вопрос согласования ВЧ-тракта с волноводом при питании ускорителя с бегущей волной от автогенератора – достаточно очень сложная задача.

Момент начала инжекции электронов в ускоритель с бегущей волной определяется требованиями к энергетическому спектру на выходе. В ускорителях для прикладных целей обычно используют схему инжекции, когда одновременно с подачей ВЧ-мощности на вход волновода подают импульс на инжектор, что улучшает питание, но ухудшает энергетический спектр.

1.2.4. Инжектор

В качестве инжектора применяется трехэлектродная электронная пушка. Она позволяет изменять в процессе работы длительность импульса ускоренного тока. Катодом инжектора служит плоская двухзаходная спираль из вольфрама, накаливаемая до температуры 2700°K .

Инжектор можно регулировать по току. Управляющее напряжение подается не на анод, который находится в электрическом контакте с корпусом и заземлен, а на катод, что соответствует отрицательной полярности импульсов модулятора. Высокое напряжение на катод подается через проходной изолятор, имеющий форму цилиндра с гофрированной поверхностью. Анодная часть инжектора охлаждается проточной водой, так как анод нагревается из-за теплового излучения катода, а также частью пучка электронов, не попадающей в отверстие анода.

1.2.5. Фокусировка пучка

Простейший метод фокусировки состоит в использовании стационарного продольного магнитного поля, которое создается обмотками 9 (рис. 1.11) на волноводе. С целью предотвращения вредного влияния магнитного поля фокусирующих катушек на прикатодную область инжектора применен магнитный экран 7. Для дополнительной фокусировки электронного пучка между инжектором и диафрагмированным волноводом размещена магнитная линза 6. Питание соленоида 9 осуществляется от трех выпрямителей.

1.2.6. Модулятор

Генераторный блок СВЧ колебаний возбуждается отрицательным прямоугольным импульсом амплитудой 45 кВ , током в импульсе 550 А с длительностью переднего фронта импульса на уровне $0,1-0,9$ амплитудного значения менее 1 мкс при суммарной неравномерности пиковой части импульса менее 3% . Высоковольтные импульсы с указанными параметрами генерируются модулятором. Нагрузкой для модулятора является входное сопротивление магнетрона. Для формирования прямоугольного импульса в модуляторе используется формирующая линия ($\PhiЛ$). При разряде предварительно заряженной $\PhiЛ$ на согласованную нагрузку на последней формируется прямоугольный импульс напряжения.

Упрощенная принципиальная схема модулятора приведена на рис. 1.12. Формирующая линия заряжается от выпрямителя через дроссель $Др$ и зарядный диод. Разряд линии происходит на первичную обмотку импульсного трансформатора $Тр$ через тиратрон $ТГИ1-2000-35$ при подаче импульса поджига на его сетку. С вторичной обмотки импульсного трансформатора повышенное до 45 кВ напряжение подается на магнетрон. Для замера среднего тока нагрузки последовательно с вторичной обмоткой импульсного трансформатора включен амперметр $ИП2$. Средний ток заряда линии измеряется амперметром $ИП1$. Форма импульса на выходе определяется параметрами формирующей линии, импульсного трансформатора и магнетрона.

Для просмотра импульсов и замера напряжения имеются устройства:

- 1) емкостной делитель $1 : 200$ – для просмотра зарядного напряжения на формирующей линии;
- 2) емкостный делитель напряжения $1:200$ – для просмотра формы напряжения на первичной обмотке импульсного трансформатора;
- 3) емкостный делитель напряжения $1:500$ – для просмотра формы напряжения на вторичной обмотке импульсного трансформатора;
- 4) пиковый детектор для замера напряжения на выходе магнетрона.

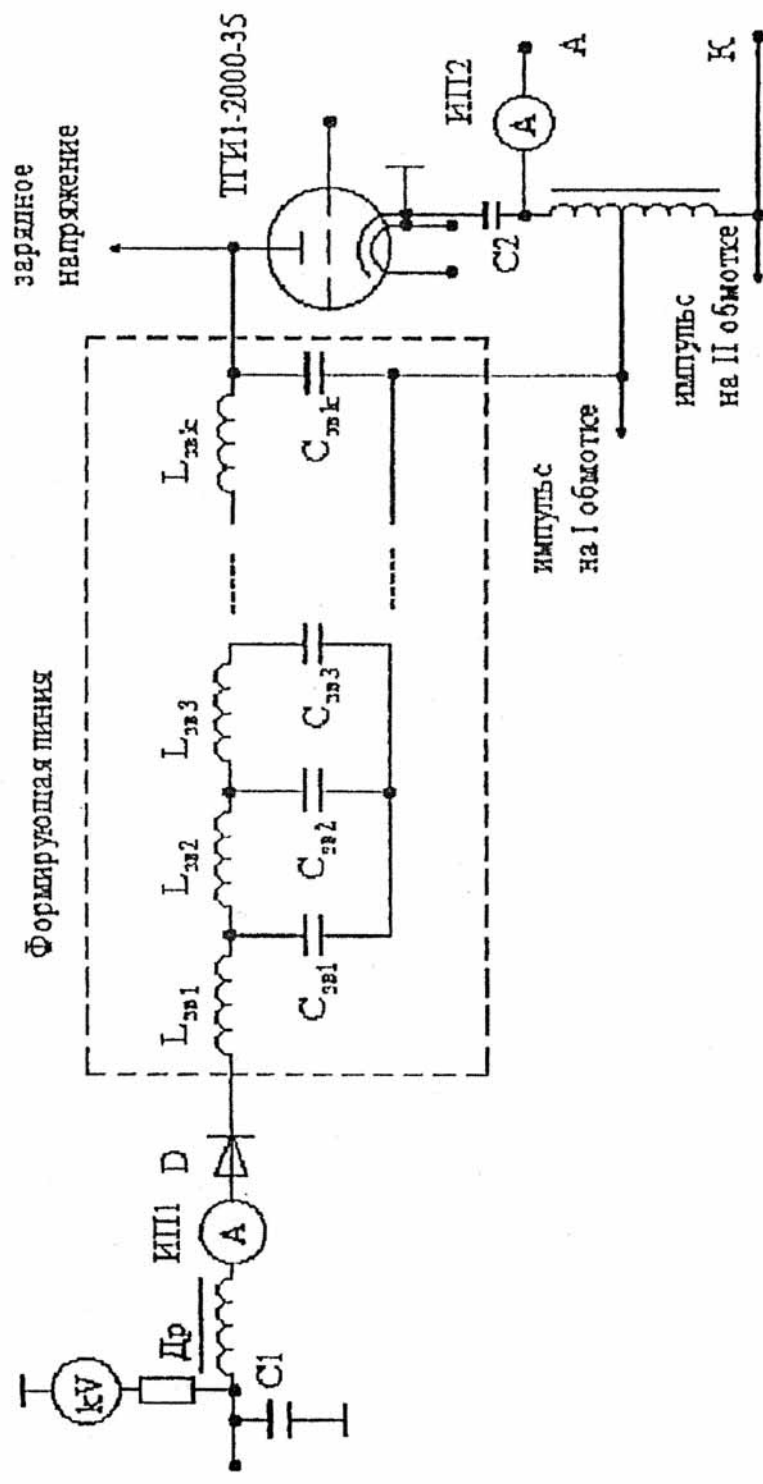


Рис. 12. Упрощенная электрическая схема модулятора

1.2.7. Регулировка и измерение параметров пучка

Ток электронного пучка регулируется подачей отрицательного запирающего напряжения на модулятор инжектора либо изменением тока накала нити инжектора. Измерение среднего тока пучка ведется магнитоиндукционным датчиком. Сигнал с датчика, пропорциональный току пучка, поступает через нормализатор на прибор «Ток ускорителя» в пульте управления. Для градуировки датчика используется калибровочная обмотка, питание которой осуществляется от специального блока питания.

Энергия электронов в пучке регулируется амплитудой высокочастотной ускоряющей волны. Если не требуется независимая от энергии регулировка тока пучка, то энергию можно регулировать, меняя ток ускоренного пучка. Для измерения энергии используется предварительно отградуированный секционированный цилиндр Фарадея.

1.3. Порядок включения и отключения ускорителя

1.3.1. Порядок включения ускорителя

1. Открыть кран подачи воды в ускорительный блок.
2. Открыть кран подачи воды в генераторный блок.
3. Визуальным осмотром проверить системы охлаждения ускорительного и генераторного блоков.
4. Привести все тумблеры рода работы в СПР в положение «Дистанционно».
5. Включить автомат В1, расположенный в СПР на блоке включения. При этом на блоке включения должна загореться специальная лампа.
6. Включить тумблер В1 на ПУУ. При этом должна загореться сигнальная лампа с надписью «дверь».
7. Включить вакуумметр, расположенный в СПР.
8. Определить давление в вакуумной системе, оно должно быть не выше $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.
9. Включить на ПУУ тумблеры «В/ВАК насосы 1, 2, 3».
10. Откачать вакуумную систему с помощью высоковакуумных насосов до давления $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. При достижении давления $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. должно погаснуть табло «Вакуум».
11. Включить на ПУУ тумблер с надписью «СОЛ» (соленид генератора) и установить требуемый, согласно таблице режимов работы ускорителя, ток. На мнемосхеме должно загореться табло «70 А».
12. Включить на ПУУ тумблер с надписью «Вакион» (насос генератора). Должно загореться табло с надписью «4 кВ». Проконтролировать напряжение и ток по приборам, расположенным в СПР на блоке 8. Напряжение по вольтметру должно возрасти до 4,5 кВ не более чем за 3 с, а ток должен быть не более 100 мкА.

13. Произвести подачу напряжения на МИ (автоматический выключатель, расположенный на отдельном щите питания модулятора 380 / 220 В).
14. Перевести переключатель режима работы (В121, на панели управления ВВ) выпрямителем МИ в положение «Дистанционно».
15. Перевести переключатель частоты запуска в положение «220 Гц» на МИ.
16. Включить тумблер УБС на ПУУ, при этом должны загореться лампочки с надписью «УБС» и «Нуль РНТ».
17. Включить тумблер «Накал» на ПУУ. После 12-минутного прогрева должна загореться лампочка с надписью «Модулятор готов».
18. Включить тумблер «Подмодулятор», при этом должна загореться лампочка с надписью «Подмодулятор».
19. Включить тумблер «Накал генератора». При этом должно загореться световое табло «Накал генератора». С помощью модулятора плавно поднять накал генератора до требуемой величины, при этом следить, чтобы ток вакиона генератора не превышал 100 мкА.
20. Открыть кран подачи воздуха в волноводный тракт, установить давление воздуха в волноводном тракте от 4 до 5 кГс/см². После этого должна погаснуть аварийная сигнализация «Воздух».
21. Оператор должен проверить, что весь обслуживающий персонал покинул ускорительный зал, после чего закрыть дверь. При этом на ПУУ должна погаснуть лампочка «Дверь».
22. Включить на ПУУ тумблер с надписью «Развертка». С помощью регулятора тока, расположенного в блоке развертки 7, установить необходимый ток согласно таблице режимов.
23. Включить тумблер с надписью «Смещение», при этом на ПУУ прибор с надписью «Смещение» должен показать напряжение 500 В.
24. Включить накал инжектора, при этом должно загореться табло на ПУУ. С помощью регулятора на ПУУ установить по прибору «Накал инжектора» необходимую величину накала.
25. Установить тумблером «Больше – меньше» на ПУУ ток генератора согласно выбранному режиму работы.
26. Подать ВН на инжектор ускорителя тумблером «ВН», на ПУУ при этом должно загореться табло «Ускоритель».
27. Плавно уменьшая напряжение смещения, установить необходимый ток ускорителя и начинать работу.
28. В процессе работы ведется заполнение рабочего журнала.

1.3.2. Порядок выключения ускорителя

1. Снять ВН с инжектора, выключая его тумблером с надписью «ВН» инжектора.
2. Выключить генератор тумблером с надписью «ВН» генератора, предварительно уменьшив напряжение тумблером «Больше – меньше».
3. Выключить накал инжектора тумблером «Накал», предварительно уменьшив его до нуля.
4. Выключить напряжение смещения тумблером с надписью «Смещение», предварительно увеличив смещение до 600 В.
5. Выключить подмодулятор тумблером на ПУУ.
6. Выключить накал модулятора тумблером на ПУУ.
7. Выключить накал генератора тумблером «Накал генератора», предварительно уменьшив его до 0.
8. Выключить УБС модулятора тумблером на ПУУ.
9. Выключить генератор развертки тумблером с надписью «Развертка».
10. Закрыть кран подачи воздуха в волноводный тракт.
11. Снять питание с соленоида ускорителя и выключить блоки тумблерами С1, С2, С3.
12. Выключить комплекс модулятора рубильником видимого разрыва, расположенным в высоковольтном выпрямителе.
13. Выключить вакион генератора тумблером с надписью «СОЛ».
14. Выключить блоки питания высоковакуумных насосов тумблерами 1, 2, 3, расположенными на ПУУ. С момента выключения накала пушки должно пройти не менее 10 мин.
15. Выключить ПУУ с помощью автоматического выключателя В1.
16. Выключить стойку питания с помощью автомата В1 на блоке включения.
17. Закрыть кран подачи воды в ускорительный и генераторные блоки.

1.3.3. Порядок временного выключения ускорителя

Временное выключение ускорителя в течение рабочего дня производится для проведения работ в ускорительном зале, не связанных с техническим обслуживанием или ремонтом ускорителя.

1. Снять ВН с инжектора, выключая его тумблером с надписью «ВН» на ПУУ, при этом должна погаснуть надпись «Ускоритель».
2. Уменьшить напряжение на генераторе с помощью тумблера на ПУУ «Больше – меньше» и выключить его тумблером с надписью «ВН». При этом погаснет надпись «50 кВ» и через небольшой промежуток времени загорится лампочка «0 РНТ».
3. Уменьшить мощность накала до 2/3 номинального значения.

4. На ПУУ повесить плакат «Не включать, работают люди».
5. На панели управления модулятором повесить плакат «Не включать, работают люди».
6. Открыть дверь в ускорительный зал, при этом должна загореться надпись «Дверь» на ПУУ.
7. После окончания работ в ускорительном зале объявить о включении ускорителя в модуляторный и ускорительный зал.
8. Оператор должен проверить, что весь обслуживающий персонал покинул ускорительный зал, после чего закрыть дверь.

1.4. Лабораторная работа № 1

Цель работы

- Изучение схемы ускорителя ЭЛУ-4, функционального назначения; принципа работы и конструкции отдельных элементов ускорителя;
- запуск ускорителя;
- изучение зависимости параметров ускоренного электронного пучка от режимов работы ускорителя.

Задание 1

1. Ознакомиться с устройством, принципом действия и взаимодействием основных блоков и узлов ускорителя.
2. Освоить порядок включения, работы и выключения ускорителя.
3. Ознакомиться с устройствами для измерения высоковольтных импульсов напряжения.
4. Ознакомиться с мерами, обеспечивающими безопасность при работе с высоковольтными установками.
5. Просмотреть форму и измерить амплитуду и длительность переднего фронта импульсов зарядного напряжения на первичной и вторичной обмотках импульсного трансформатора и зарисовать эпюры напряжений.

Задание 2

1. Провести запуск ускорителя, настроить на режим излучения и проконтролировать параметры режима работы ускорителя.
2. Измерить ток пучка электронов.
3. Методом фотографирования определить геометрические параметры электронного пучка на выходе из ускорителя.
4. Измерить энергию электронов и исследовать зависимость энергии от величины тока пучка и от мощности генератора.

По каждому из заданий оформить отчет.

1.5. Контрольные вопросы

1. Почему линейные резонансные ускорители со стоячей волной не применяются для ускорения электронов?
2. Для чего необходима группировка электронов в сгустке в ЛУЭ?
3. Какие существуют способы группировки в ЛУЭ?
4. Чем вызвана необходимость фокусировки ускоряемого в ЛУЭ пучка? Как осуществляется фокусировка?
5. Почему энергия электронов на выходе ЛУЭ зависит от величины тока пучка?
6. Как регулируется энергия ускоренных электронов и ток пучка?
7. Чем определяется предельная величина тока пучка в ЛУЭ?
8. Почему ЛУЭ работает в импульсном, а не в непрерывном режиме?

1.6. Список литературы

1. Е.Г. Комар. Основы ускорительной техники. – М.: Атомиздат, 1975.
2. А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов. Основы физики и техники ускорителей. – Т. 3. – Линейные ускорители. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. О.А. Вальднер, А.Д. Власов, А.В. Шальнов. Линейные ускорители. – М.: Атомиздат, 1969.

2. МИКРОТРОН

2.1. Введение

Микротрон во многом подобен обычному циклотрону Лоуренса. Как и в этом первом циклическом ускорителе, в микротроне частицы движутся в постоянном и однородном магнитном поле $H(r,t) = const$. Ускорение здесь также происходит под действием переменного электрического поля постоянной частоты $\omega_{\text{вск}}(t) = const$ в резонаторе, источником возбуждения которого является импульсный СВЧ генератор (магнетрон, клистрон). Но в отличие от циклотрона, микротрон был предложен для ускорения легких заряженных частиц до релятивистских энергий $W \gg m_0 c^2$, где $m_0 c^2$ – энергия покоя. Применение микротрона на первом этапе сдерживалось сравнительно малой интенсивностью ускоренного пучка. Однако, позднее в связи с развитием радиолокации, были разработаны более мощные импульсные магнетроны, генерирующие в сантиметровом диапазоне длин волн колебания мощностью до нескольких мегаватт. Также были предложены более совершенные объ-

емные резонаторы с добротностью порядка нескольких тысяч. Благодаря этим факторам и был создан современный высокоэффективный ускоритель электронов – микротрон.

В 60-е годы микротроны нашли применение как инжекторы для синхротронов. Впервые эта цель была реализована на синхротроне в Лунде (Швеция). В России микротрон – инжектор был использован на синхротронах в Москве (синхротрон ФИАНа) и Томске (синхротрон ТПУ «Сириус»).

Дальнейшее развитие идеи микротрона нашли в работах Е.М.Мороза и А.Робертса. Они предложили использовать азимутально-неоднородное магнитное поле (разрезной микротрон). В таком ускорителе траектории частиц состоят из прямых и дуг окружностей. Резонатор располагается в плоскости симметрии магнита в области, где магнитного поля нет. Преимуществом разрезного микротрона является возможность достижения больших энергий электронов. Например, в Майнце (Германия) работает разрезной микротрон на энергию 850 МэВ, а в НИИ ЯФ МГУ в 2001 г. был запущен самый компактный в мире ускоритель электронов – разрезной микротрон на энергию 70 МэВ.

В настоящее время считается, что в диапазоне от 5 до 70 МэВ микротрон является наиболее эффективным типом ускорителя для дефектоскопии, радиоактивационного анализа и для научных исследований. В частности, на описываемом ниже микротроне с перестраиваемой энергией ((1,5–5,7) МэВ) НИИ ЯФ при ТПУ впервые исследованы процессы каналирования электронов в кристаллах и генерация специальных видов жесткого рентгеновского излучения – излучения при каналировании и параметрического рентгеновского излучения. Данный микротрон широко используется для проведения научно – исследовательских работ.

2.2. Принцип действия микротрона

В микротроне частицы ускоряются переменным электрическим полем постоянной частоты в постоянном и однородном магнитном поле. Электроны движутся в вакуумной камере по орбитам – окружностям, имеющим общую точку касания (рис. 2.1). В этом месте располагается резонатор, сверхвысокочастотное электрическое поле которого ускоряет электроны. Резонатор возбуждается мощным источником сверхвысокочастотных колебаний – импульсным магнетроном мощностью порядка (1–2) МВт, представляющим собой генераторный электровакуумный прибор СВЧ.

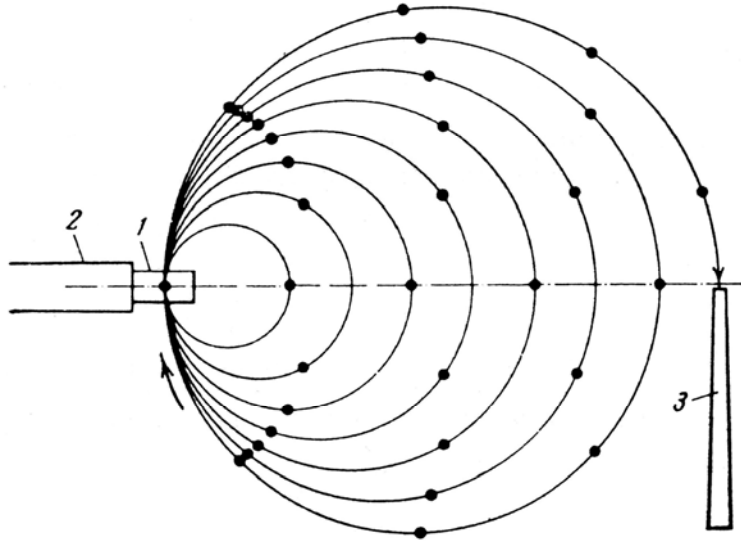


Рис. 2.1. Движение частиц в микротроне:

1 – ускоряющий резонатор, 2 – волновод, 3 – магнитный канал для вывода электронов

При каждом прохождении через резонатор 1 электроны приобретают энергию ΔW и затем начинают двигаться по следующей орбите. Когда электроны достигнут последней орбиты, они через магнитный канал 3 выводятся из камеры. В магнитном канале магнитное поле близко к нулю за счет экранирования ферромагнитным материалом стенок.

Синхронизм между движением электрона и изменением ускоряющего СВЧ поля достигается благодаря тому, что период времени каждого следующего оборота T увеличивается на целое число a периодов СВЧ колебаний электрического поля в резонаторе. Отношение T к периоду ускоряющего поля $T_{УСК}$ принято называть кратностью режима ускорения. Поэтому микротрон является ускорителем с переменной кратностью (рис. 2.2).

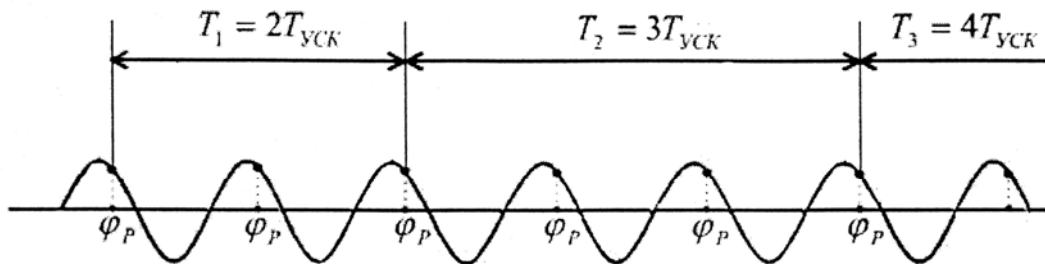


Рис. 2.2. Периоды обращения электронов на последовательных орбитах

Период времени обращения T релятивистской частицы в магнитном поле H определяется формулой:

$$T = \frac{2\pi E}{ec H}, \quad (2.1)$$

где $E = W + E_0$ – полная энергия частицы, W – кинетическая энергия, e – заряд электрона, c – скорость света в вакууме.

Так как $H(r,t) = const$ условие синхронизма имеет вид:

$$\Delta T = \frac{2\pi}{ec} \frac{\Delta E}{H} = \frac{2\pi \Delta W}{ecH} = aT_{VCK}, \quad (2.2)$$

где ΔE – приращение энергии электрона при прохождении через резонатор, ΔT – соответствующее приращение времени движения по орбите, T_{VCK} – период сверхвысокочастотного поля в резонаторе.

При выполнении условия (2.2) электрон проходит через резонатор в одной и той же фазе сверхвысокочастотного поля (рис. 2.2). Обозначим кратность для первой орбиты через b :

$$\frac{T_1}{T_{VCK}} = b \quad (2.3)$$

Энергия электрона до его попадания на первую орбиту $E_{НАЧ} = W_{НАЧ} + E_0$, а период обращения электрона с такой энергией $T_{НАЧ}$ запишем в виде:

$$\frac{T_{НАЧ}}{T_{VCK}} = d \quad (2.4)$$

Поскольку $T_1 = T_{НАЧ} + \Delta T$, т. е. $bT_{VCK} = dT_{VCK} + aT_{VCK}$, d должно быть целым числом, т.к. b и a – целые числа. Отсюда следует уравнение

$$b = d + a, \quad (2.5)$$

называемое **уравнением кратности**, из которого следует, что все параметры, характеризующие режим ускорения, могут принимать только дискретный набор значений, однозначно связанных между собой. Найдем, например, связь между приращением энергии ΔE и начальной энергией $E_{НАЧ}$ (энергией инжекции). Очевидно, что

$$T_0 = dT_{VCK} = \frac{2\pi E_{НАЧ}}{ecH} \quad (2.6)$$

Комбинируя эту формулу с формулой (2.2) для ΔE , получаем

$$\Delta E = \frac{a}{d} E_{НАЧ} \quad (2.7)$$

Обычно реализуются режимы ускорения, для которых $a = 1$. Поэтому с учетом (2.5):

$$\Delta E = \frac{1}{d} E_{НАЧ} = \frac{1}{b-1} E_{НАЧ} = \frac{b-d}{d} E_{НАЧ} \quad (2.8)$$

Подстановка в формулу (2.2) ΔE по формуле (2.8) позволяет найти требуемую величину магнитного поля:

$$\begin{aligned}
aT_{\text{УСК}} &= \frac{2\pi}{ecH} \frac{1}{b-1} E_{\text{НАЧ}} \\
\lambda H &= \frac{2\pi E_{\text{НАЧ}}}{e} \frac{1}{b-1},
\end{aligned} \tag{2.9}$$

где λ – длина волны ВЧ-колебаний в резонаторе.

Магнитное поле, в котором электрон с массой, равной массе покоя, вращается с периодом, равным $T_{\text{УСК}}$, называют «циклотронным» (по аналогии с полем циклотрона, обеспечивающим резонанс в начале ускорения).

$$T = T_{\text{УСК}} = \frac{2\pi E_0}{ecH_{\text{ЦИКЛ}}}, \tag{2.10}$$

где E_0 – энергия покоя электрона.

Микротроны, как и большинство линейных ускорителей электронов, работают в 10-сантиметровом диапазоне длин волн. При частоте 3000 МГц ($\lambda = 10$ см) циклотронное поле

$$H_{\text{ЦИКЛ}} = \frac{2\pi E_0}{e\lambda} = 1070 \text{ эрстед}.$$

Удобно задать магнитное поле из формулы (2.9) в единицах $H_{\text{ЦИКЛ}}$

$$\frac{H}{H_{\text{ЦИКЛ}}} = \frac{E_{\text{НАЧ}}}{E_0} \frac{1}{d} = \left(1 + \frac{W_{\text{НАЧ}}}{E_0}\right) \frac{1}{d} = \left(1 + \frac{W_{\text{НАЧ}}}{E_0}\right) \frac{1}{b-1} \tag{2.11}$$

Введем параметр $\Omega = H / H_{\text{ЦИКЛ}}$. Он является основной характеристикой режима ускорения, т.к. все основные свойства ускорителя связаны с этим параметром. Так, подставляя в формулу (2.7) $E_{\text{НАЧ}}$ по формуле (2.11), получаем:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = a \frac{H}{H_{\text{ЦИКЛ}}} = a\Omega \tag{2.12}$$

Легко показать, что

$$\begin{aligned}
\frac{E_1}{E_0} &= b\Omega \\
\frac{E_{\text{НАЧ}}}{E_0} &= (b-1)\Omega
\end{aligned} \tag{2.13}$$

В микротроне обычно $\Delta E / E_0 \approx 1$. Именно в этом заключается основное отличие микротрона от всех других циклических ускорителей, где в основе принципа действия лежит малость приращения энергии частицы за оборот по сравнению с энергией, приобретаемой за все время ускорения. Поэтому число оборотов в них очень велико, в то время как число орбит в микротроне существенно меньше: в ныне построенных машинах оно не превышает шестидесяти.

При каждом прохождении через резонатор энергия электрона должна увеличиваться на величину порядка энергии покоя. Создание такого ускоряющего поля является основной проблемой при работе микротрона. Например, при $\lambda = 10$ см, $\Omega = 1$, величине ускоряющего промежутка резонатора 1,6 см напряженность электрического поля составляет $E_{ЭЛ} = 320$ кВ/см. Эту проблему удалось решить благодаря наличию мощных магнетронов и объемных резонаторов с добротностями порядка 10^4 .

Ускорение протонов и более тяжелых заряженных частиц в микротронах существующего типа невозможно, поскольку для этого требуются СВЧ поля с напряженностью в тысячи раз большей.

2.3. Инжекция электронов в микротроне

Из формулы (2.13) следует, что значения параметров режима ускорения в конечном итоге определяются начальной энергией электрона, т. е. способом инжекции. В первых микротронах с тороидальными резонаторами использовались два способа инжекции.

1. Эмиссия электронов происходит непосредственно со стенки резонатора под действием ускоряющего поля, т. е. $W_{НАЧ} = 0$ и $E_{НАЧ} = E_0$.

2. Электроны вводятся в резонатор с небольшой начальной энергией с помощью электронной пушки.

В первом случае магнитное поле $H = H_{ЦИКЛ}$, т. е. сравнительно невелико, а энергия ускоренных электронов может принимать только значения, кратные энергии покоя, причем на фиксированной орбите энергия вообще не может быть изменена. Во втором случае магнитное поле по-прежнему мало и также имеет фиксированную величину ($\Omega \approx 1,15$).

В настоящее время используются плоские резонаторы, толщина которых гораздо больше, чем тороидальных, и в которых высокочастотное электрическое поле при удалении от центра убывает гораздо медленнее. Они имеют вид цилиндра, диаметр которого в несколько раз больше высоты. Резонансная частота колебаний теоретически зависит только от диаметра резонатора, причем диаметр D и резонансная длина волны λ связаны соотношением $D = 0,735 \lambda$ (в микротроне НИИ ЯФ $\lambda = 11,2$ см).

Высота резонатора обычно выбирается в пределах $L = \lambda/5 \div \lambda/4$. Такой резонатор подобен одной ячейке линейного ускорителя.

Предварительное ускорение до энергии $E_{НАЧ}$ осуществляется высокочастотным ускоряющим полем при движении электрона внутри резонатора, а эмиссия электронов происходит с термокатода, расположенного на его боковой стенке. Используются два варианта предварительного ус-

корения. В первом варианте эмиттер располагается приблизительно посередине радиуса резонатора (рис. 2.3, а). Во втором – электроны начинают свой путь вблизи оси резонатора и, следуя по более сложной траектории, выходят из резонатора через добавочное отверстие (рис. 2.3, б).

При таких способах инжекции параметр Ω , т. е. магнитное поле, можно менять сколь угодно плавно, регулируя высокочастотную мощность таким образом, чтобы обеспечить соответствующий этому полю прирост энергии за оборот. Поскольку прирост энергии и магнитное поле меняются пропорционально, расположение орбит в первом приближении не изменится, и на каждой орбите энергия частиц возрастает пропорционально Ω . Причем, при использовании первого варианта энергию частиц можно плавно изменять в достаточно широких пределах и без настройки резонатора, т.к. форма траекторий электронов в резонаторе и, следовательно, $E_{НАЧ}$ зависит от координаты, угла и фазы вылета электрона из эмиттера. При изменении магнитного и ускоряющего электрического полей всегда найдутся электроны, начальная фаза, координата и угол вылета которых из эмиттера таковы, что они приобретают требуемую $E_{НАЧ}$. Это возможно только при пролетных отверстиях в резонаторе в виде горизонтальных щелей, поскольку при этом меняется координата вылета электронов на первую орбиту.

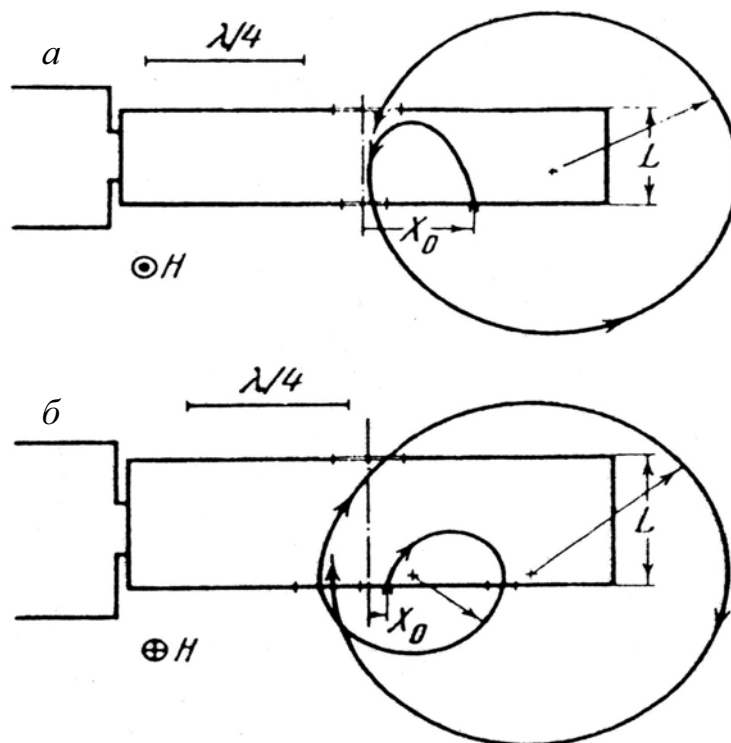


Рис. 2.3. Способы инжекции электронов в микротрон: а – первый вариант ускорения; б – второй вариант ускорения

Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что резонансное ускорение возможно в диапазоне $0,65 < \Omega < 1,7$ для первого варианта (при $b = 2$) и $1,7 < \Omega < 2,2$ при втором варианте предварительного ускорения.

В микротроне НИИ ЯФ используется первый вариант предварительного ускорения. Минимальная энергия ускоренных электронов на первой орбите $E_1 = 1,26$ МэВ, на второй орбите $E_2 = 1,89$ МэВ и т. д. Максимальная энергия на девятой орбите $E_9 = 6,2$ МэВ.

2.4. Орбитальная устойчивость

Магнитное поле в микротроне однородное ($n = 0$) и вертикальная фокусировка целиком определяется СВЧ полем резонатора. В случае резонатора с круглыми пролетными отверстиями (рис. 2.3) имеет место динамическая фокусировка ускоряющим полем, которая по мере ускорения сходит на нет. Эта фокусировка слаба и амплитуда вертикальных колебаний растет по мере ускорения. Усиление вертикальной фокусировки обеспечивается изменением формы пролетных отверстий. Если выходное отверстие резонатора имеет форму горизонтальной щели, а входное – вертикальной, то вертикальная составляющая ВЧ поля, которая на выходе является фокусирующей, увеличивается, а на входе, где она дефокусирует, вообще отсутствует. Но такое выходное отверстие дефокусирует в горизонтальной плоскости. Оптимальной фокусировки добиваются подбором формы входной и выходной щелей резонатора.

Радиальные колебания в плоскости орбит определяются совместным действием постоянного магнитного поля («мягкая» фокусировка) и ВЧ-поля резонатора. Однако, поскольку магнитное поле в микротроне однородно (показатель спада $n = 0$) движение в таком поле обладает резонансной неустойчивостью – любая малая неоднородность поля существенно возмущает движение, что ограничивает максимально возможное число орбит.

2.5. Фазовое движение в микротроне

Фазовая устойчивость в микротроне, как и в других циклических резонансных ускорителях, обеспечивается автофазировкой, но характер фазового движения отличается от такового для других ускорителей. В последних прирост энергии за оборот относительно мал, изменение периода обращения мало и ускоряемая частица испытывает небольшой сдвиг по фазе за оборот. Медленно перемещаясь по фазовой траектории, она совершает сотни и тысячи оборотов за период фазовых колебаний.

В микротроне прирост энергии велик и небольшое отклонение прироста энергии от равновесного приводит к значительному изменению периода обращения. Перемещение по фазовой траектории происходит скачками, и частица успевает совершить всего четыре-пять оборотов за период фазовых колебаний.

На рис. 2.4 в качестве примера показано движение изображающей точки на фазовой диаграмме за пять оборотов по орбите. Если зависимость ускоряющего поля от фазы пролета слишком сильна и автофазирующая сила чересчур велика, то это приводит к раскачке фазовых колебаний. В микротроне фазовое движение устойчиво, если равновесная фаза лежит в пределах от 90° до 122° . Минимальной амплитуде фазовых колебаний соответствует выбор равновесной фазы в середине этого интервала. В других ускорителях фазовое движение неустойчивостью такого типа не обладает.

В микротроне размах колебаний и размеры пучка определяются областью фазовой и орбитальной устойчивости. Границы области устойчивости невелики и приводят к формированию сгустков электронов длиной $(5 \div 8)$ мм, высотой $(1 \div 5)$ мм и шириной $(3 \div 6)$ мм при $\lambda = 10$ см. Объем, в котором возможно устойчивое движение частиц, невелик, поэтому пучок электронов микротрона хорошо сколлапсирован и моноэнергетичен.

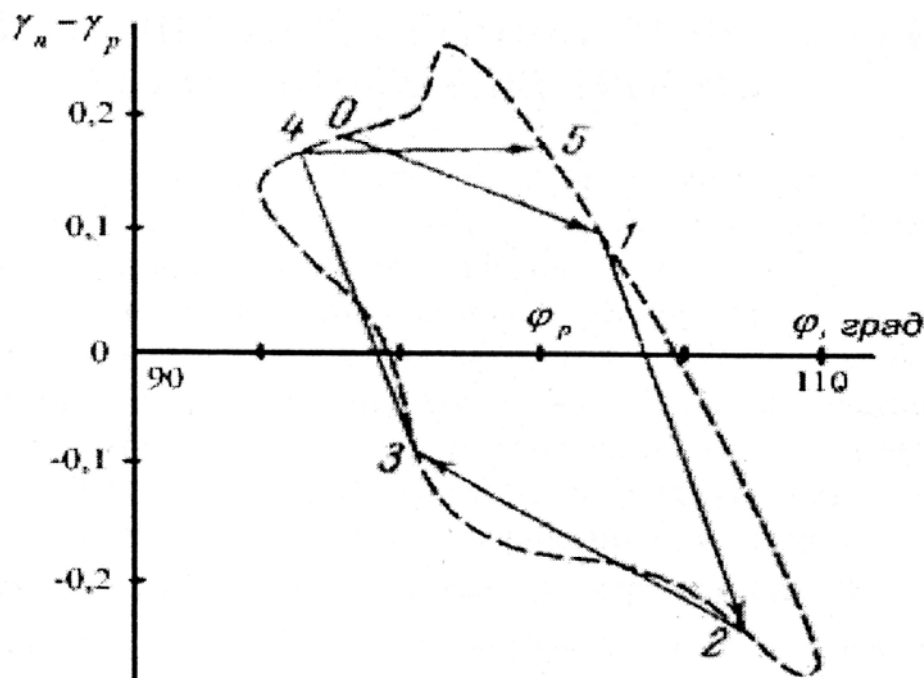


Рис. 2.4. Фазовое движение электрона в микротроне на первых пяти оборотах

2.6. Микротрон с перестраиваемой энергией ускоренных электронов

Микротрон с перестраиваемой энергией выведенного пучка электронов был создан в НИИ Ядерной физики Томского политехнического университета в 1985 г. и является составной частью экспериментальной установки для комплексного исследования ориентационных эффектов взаимодействия электронов средних энергий с монокристаллами. Необходимость создания данного ускорителя диктовалась тем, что комплексные исследования ориентационных эффектов взаимодействия электронов средних энергий с монокристаллами требуют изменения энергии выведенного пучка электронов при его неизменной оси в пространстве. Следует заметить, что именно микротрон наиболее полно удовлетворяет требованиям эксперимента ввиду малой относительной немоноэнергетичности пучка электронов $\Delta W / W = 0,1 \%$, малой начальной расходимости пучка (в вертикальной плоскости – $0,06^\circ$, в медианной – $0,3^\circ$), достаточно большого импульсного тока выведенного пучка электронов ($I_{имп} = 40 - 50$ мА).

Для вывода пучка из ускорителя обычно используется магнитный канал – железная труба, в полости которой напряженность магнитного поля мала в силу экранирующего действия стенок трубы. Попадая в этот канал (шунт), пучок электронов движется почти прямолинейно и легко выводится из микротрона. Наиболее универсальное выводное устройство удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) существует возможность выводить электроны с любой орбиты, начиная со второй;
- 2) выведенный пучок должен попадать в одну и ту же неподвижную апертуру экспериментальной установки, в которой он используется, независимо от того, с какой орбиты он выведен;
- 3) в указанную апертуру пучок должен входить по одному и тому же направлению.

На рис. 2.5 приведена схема вывода пучка электронов, удовлетворяющая приведенным выше требованиям. В камере микротрона вмонтирован неподвижно выводной шунт. Резонатор микротрона соединен с подвижной вставкой, имеющей пружинные контакты, которая введена в неподвижный волноводный тракт. Выводное устройство работает следующим образом: пучок электронов, введенный в полость резонатора, ускоряется электрическим полем резонатора и далее движется в магнитном поле по круговой орбите, но уже большего радиуса. На последней орбите пучок попадает в отверстие шунта и, двигаясь прямолинейно, выводится из камеры микротрона. Таким образом, пучок электронов

N раз проходит через резонатор, выводится с N -ой орбиты и имеет кинетическую энергию на выходе $W = N\Delta W + W_0$, где ΔW – прирост энергии электронов за один проход через резонатор. Энергия выведенного пучка электронов, магнитное поле, ускоряющее поле резонатора и расстояние между резонатором и шунтом строго взаимосвязаны. Энергию выведенного пучка электронов изменяют следующим образом. Резонатор с волноводной вставкой и прикрепленными к ней пружинными контактами устанавливаются относительно выводного шунта механизмом перемещения вдоль общего диаметра орбит электронов на расстояние D , кратное расстоянию d между соседними орбитами $D = kd$, где $k = 1, 2, \dots$ (рис. 2.5). При этом вывод ускоренных электронов осуществляется с $(N-1)$, $(N-2)$ и следующих орбит, а энергия выведенного пучка изменяется на $k\Delta W$. Согласование ускоряющего резонатора и магнетрона осуществляется фазовращателем и ферритовым вентиляем.

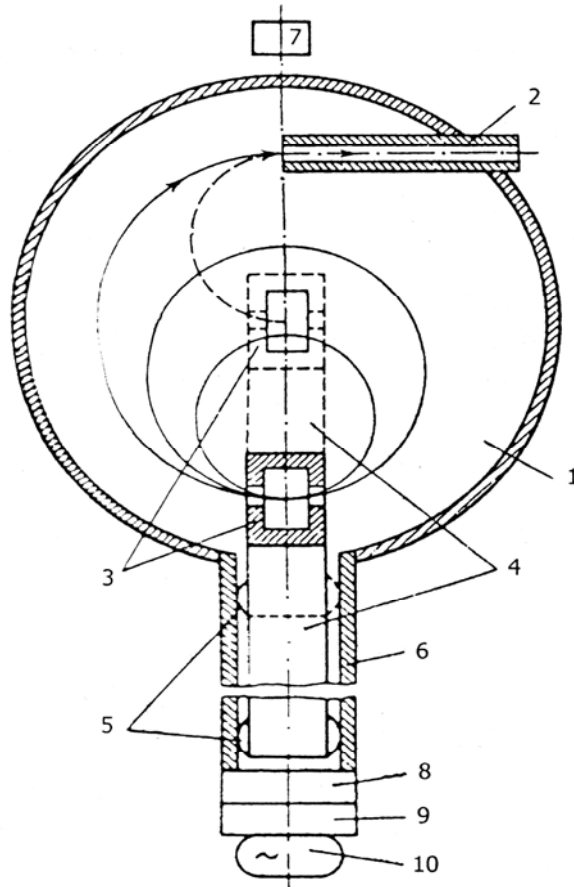


Рис. 2.5. Схема вывода пучка электронов:
 1 – камера микротрона, 2 – выводной шунт, 3 – резонатор,
 4 – волноводная вставка, 5 – пружинные контакты, 6 – неподвижный волноводный тракт, 7 – механизм перемещения резонатора, 8 – фазовращатель,
 9 – ферритовый вентиль, 10 – магнетрон

Для питания магнетрона разработан и изготовлен модулятор, выполненный по схеме генератора импульсов с частичным разрядом накопительного конденсатора. Блок-схема модулятора приведена на рис. 2.6.

В шкафу модулятора смонтированы высоковольтный выпрямитель, импульсный трансформатор, подмодулятор, схема управления, блокировки и сигнализации, а также высоковольтные элементы, принимающие участие в формировании мощного выходного импульса. Модулятор снабжен дистанционным и местным управлением. Блок стабилизации и схема запуска размещены в пультовой ускорителя. При включении выпрямителя накопитель заряжается через зарядный резистор, корректирующую цепочку и первичную обмотку импульсного трансформатора. Уровень напряжения на накопителе устанавливает схема стабилизации. В качестве коммутатора применена лампа ГМИ-14Б. Для охлаждения лампы используется принудительное воздушное охлаждение.

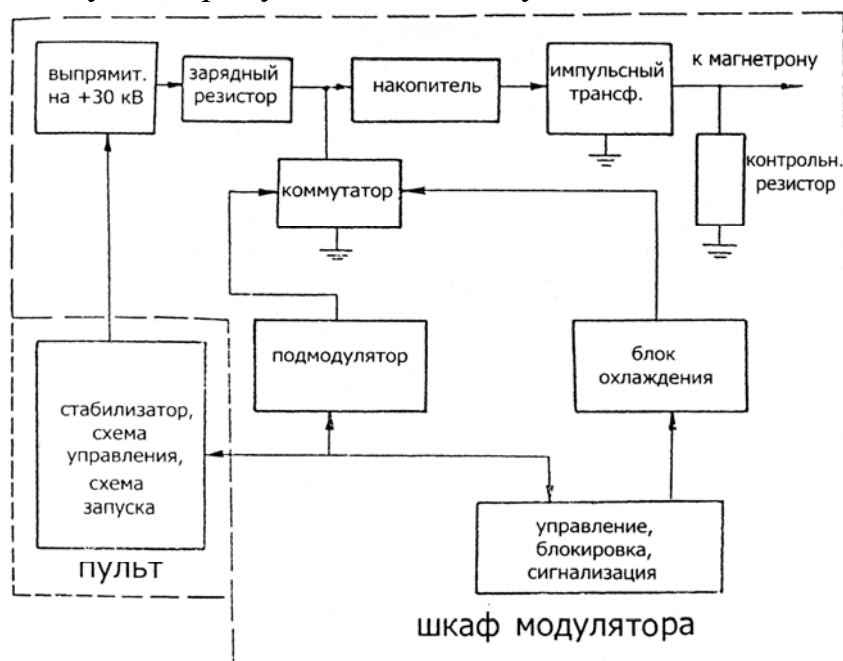


Рис. 2.6. Блок-схема модулятора

Лампа отпирается положительными импульсами подмодулятора амплитудой 1,35 кВ. Импульсный трансформатор выполнен двухпроводной намоткой для передачи напряжения накала магнетрона.

После запуска модулятор обеспечивает следующие параметры.

1. Мощность в импульсе – 3,5 МВт.
2. Амплитуда импульса – 55 кВ.
3. Длительность импульса – 1 мкс.
4. Неравномерность вершины импульса – не более 0,5 %.
5. Нестабильность амплитуды – не более 0,5 %.

6. Частота следования импульсов – до 25 Гц.

7. Мощность, потребляемая от сети – 1,5 кВт.

Механизм перемещения состоит из двух неподвижных направляющих, закрепленных на нижнем полюсе электромагнита, и подвижной пластины, перемещающейся по полюсу между ними (зацепление «ласточкин хвост»). Подвижный шток жестко соединен с пластиной (на которой расположена волноводная вставка с резонатором) и через вакуумное уплотнение в камере соединен с редуктором и реверсивным двигателем. Для уменьшения трения в механизме перемещения резонатора используется графитовая смазка. Детали механизма перемещения резонатора, находящиеся в камере микротрона, выполнены из немагнитных материалов.

На рабочую частоту высокочастотного генератора резонатор настраивается путем деформации одной из его стенок. Механизм настройки частоты резонатора приводится в действие сельсинами. Электро- и водоснабжение резонатора выполнены подвижными. Изменение электрической длины СВЧ – тракта при перемещении резонатора с волноводной вставкой компенсируется мостовым фазовращателем 10 см диапазона с дистанционным приводом.

Вывод пучка ускоренных электронов осуществляется с любой из девяти орбит при постоянном положении оси выведенного пучка в пространстве.

Выведенный электронный пучок имеет следующие параметры.

1. Энергия выведенного пучка – $W = 1,5 \dots 5,7$ МэВ.

2. Энергетический разброс пучка – $\Delta W / W \leq 0,3 \%$.

3. Начальная расходимость пучка:

- в вертикальной плоскости – $0,06^\circ$;

- в горизонтальной (медианной) плоскости – $0,3^\circ$.

4. Частота сбросов – до 25 Гц .

5. Длительность импульса – 0,5...4 мкс.

6. Ток выведенного пучка – до 40 мА.

2.7. Экспериментальная установка на основе микротрона с перестраиваемой энергией

На базе микротрона с перестраиваемой энергией до 5,7 МэВ в НИИ ЯФ при ТПУ создана экспериментальная установка, позволяющая проводить на выведенном электронном пучке ряд уникальных исследований.

Экспериментальная аппаратура размещена в экспериментальном зале за защитной бетонной стеной толщиной 1 м. Боковой канал (тракт III,

$\varphi = -30^\circ$) используется для исследований по радиационной физике и различных технологических применений, связанных либо с выведенным в атмосферу электронным пучком, либо с набором больших доз облучения электронным или тормозным фотонным пучком внешней мишени. На двух других каналах I, II смонтированы многоцелевые установки, оснащенные системами электронного и визуального мониторинга, системами регистрирующих сцинтилляционных, пропорциональных, координатных, полупроводниковых датчиков, системами воздушных, вакуумных, криогенных автоматизированных гониометров. Ток пучка на последней орбите измеряется с помощью подвижной коллекторной пластины, устанавливаемой на входе выводного шунта. Схема экспериментального зала приведена на рис. 2.7.

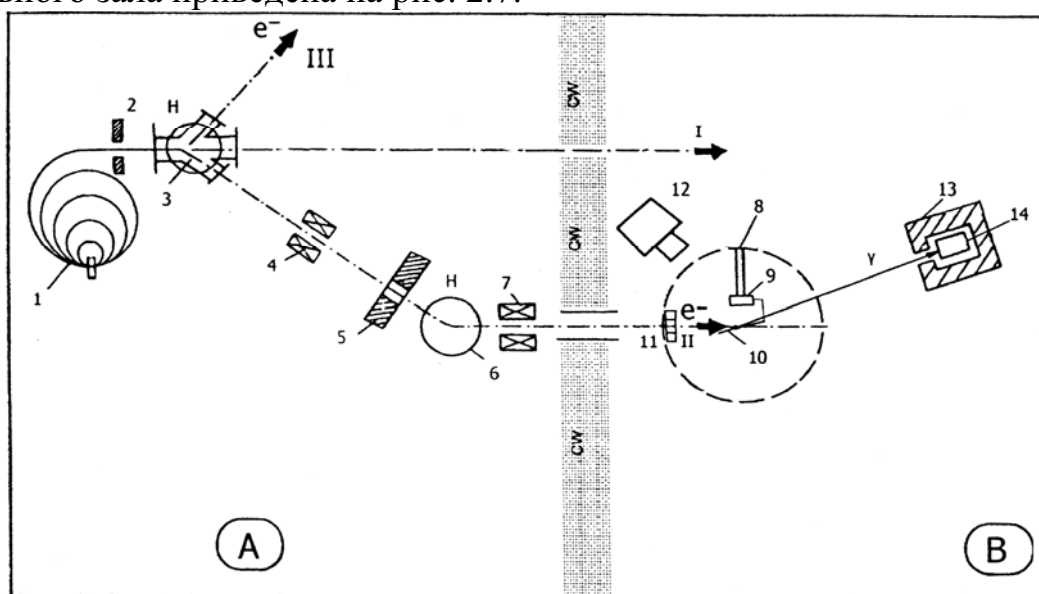


Рис. 2.7. Схематическое расположение ускорителя (зал А) и экспериментального зала (зал В). В зале В дано схематичное изображение установки для исследования параметрического рентгеновского излучения (ПРИ).

Показано три тракта электронных пучков – I, II, III

Пучок электронов, ускоренных в микротроне 1 до необходимой энергии E , выводится из микротрона и попадает в раздаточный магнит 3. Возбуждение резонатора микротрона осуществляется от магнетронного генератора через волноводный тракт. Выходные направления магнита: $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = \pm 30^\circ$. Установленный в выводном шунте коллиматор 2 системы формирования пучка имеет диаметр 1,4 мм. Второй коллиматор 5 системы формирования имеет диаметр 0,75 мм. Коррекция направления пучка осуществляется при помощи корректоров 4 и 7, позволяющие перемещать пучок в двух взаимно перпендикулярных направлениях и, соответственно, выбирать рабочее место встречи ускоренного электронного пучка с кристаллической мишенью 10,

установленной в гониометрическом устройстве 9. Наблюдение за положением пучка относительно мишени осуществляется с помощью телевизионной камеры 12. Второй поворотный магнит 6 позволяет отклонить уже сформированный электронный пучок на угол $\approx 20^\circ$ и направить в камеру рассеяния. В промежутке между выводным шунтом и раздаточным магнитом 3 установлена стандартная система квадрупольных линз, позволяющая производить необходимую фокусировку электронного пучка.

Система раздаточных и очистных магнитов, бетонная защита и существующее расположение тракта формирования позволяют максимально подавить фон тормозного излучения электронного пучка в зале регистрации. Все коллиматоры выполнены из алюминия, они позволяют измерять ток падающих на них электронов с помощью усилителей, цифровых или стрелочных приборов и осциллографов. Измерение спектра исследуемого гамма или рентгеновского излучения осуществляется детектором 14, окруженным свинцовой защитой 13.

На входе в камеру рассеяния установлен магнитоиндукционный датчик 11, позволяющий непрерывно в течение эксперимента осуществлять контроль величины ускоренного тока, падающего на мишень.

Камера рассеяния 8 представляет собой цельнометаллическую конструкцию с внутренним диаметром рабочего объема ≈ 400 мм и высотой 300 мм.

На первом и втором выведенных пучках электронов микротрона были проведены и продолжаются в настоящее время исследования по широкому кругу проблем ядерной физики, например, «Излучение электронов при каналировании в кристаллах», «Рентгеновское параметрическое излучение электронов в кристаллах» и т.д. Проводимые эксперименты поддерживаются грантами РФФИ, Министерства образования РФ и зарубежных научных организаций.

2.8. Порядок включения и выключения ускорителя

2.8.1. Включение ускорителя

1. Включить форвакуумный насос.
2. Залить в азотную ловушку жидкий азот.
3. Открыть вакуумный вентиль.
4. Открыть краны подачи воды на охлаждение высоковакуумных насосов НОРД–100 и НОРД–250.
5. По достижении в системе вакуума ($10^{-2} - 5 \times 10^{-3}$) Торр ($60 \div 80$ делений по шкале термометрического вакуумметра) открыть вакуумные заслонки высоковакуумных насосов.

6. Через 1–1,5 часа включить рубильник питания пульта управления в пультовой.
7. Открыть краны подачи воды для охлаждения магнетрона и резонатора.
8. Включить рубильник питания модулятора.
9. Включить воздушное охлаждение модулятора.
10. Включить тумблер «Низкое» модулятора.
11. Включить питание ионизационного вакуумметра и дождаться, когда давление в вакуумной системе станет меньше чем 2×10^{-6} Торр.
12. Постепенно (в 3–4 приема) поднять напряжение накала магнетрона до 220 В.
13. Включить тумблеры подачи постоянных напряжений на катод микротрона.
14. Через 2–3 минуты постепенно поднять ток накала катода до 36 мА.
15. Включить питание ПТУ (промышленная телевизионная установка).
16. Закрыть дверь зала.
17. Включить кнопку «Высокое» на пульте управления.
18. Плавным поворотом ручки «Высокое» довести высокое напряжение до значения 68–70 делений по стрелочному прибору на пульте управления, наблюдая по осциллографу за величиной тока микротрона.
19. На экране осциллографа С1-65А убедиться в наличии ускоренного пучка на входе в камеру рассеяния.
20. В процессе работы ведется заполнение рабочего журнала.

2.8.2. Временное выключение ускорителя

Временное отключение ускорителя в течение рабочего дня производится для проведения работ в ускорительном зале, не связанных с техническим обслуживанием или ремонтом ускорителя.

1. Ручкой «Высокое» вывести высокое напряжение до нуля.
2. Выключить кнопкой высокое напряжение, при этом на пульте должна погаснуть сигнальная лампочка.
3. Открыть дверь в ускорительный зал.
4. После окончания работ в ускорительном зале объявить о включении ускорителя.
5. Необходимо проверить, что весь персонал покинул ускорительный зал, после чего закрыть дверь.

2.8.3. Выключение ускорителя

1. Ручкой «Высокое» вывести высокое напряжение до нуля.
2. Выключить кнопкой высокое напряжение, при этом должна погаснуть сигнальная лампочка на пульте управления.

3. Вывести ток накала катода до нуля.
4. Выключить тумблеры подачи постоянных напряжений на катод.
5. Кнопкой «Низкое» выключить низкое напряжение модулятора.
6. Выключить ПТУ.
7. Выключить рубильник питания пульта управления.
8. Открыть дверь в ускорительный зал.
9. Закрывать вакуумные заслонки высоковакуумных насосов.
10. Выключить высоковакуумные насосы.
11. Перекрыть все водяные краны охлаждения.
12. Вывести на ноль накал магнетрона.
13. Выключить воздушное охлаждение модулятора.
14. Закрывать ускорительный зал.

2.9. Лабораторная работа № 2

Цель работы

- Ознакомление с назначением, устройством и принципом действия основных узлов ускорителя;
- освоение порядка включения, настройки и управления работой ускорителя;
- исследование зависимости тока пучка на последней орбите от режимов работы ускорителя.

Задание

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности при работе на ускорителе.
2. Ознакомиться с устройством, принципом действия и взаимодействием основных блоков и узлов ускорителя.
3. Освоить порядок включения, работы и выключения ускорителя.
4. Просмотреть форму и измерить длительность импульса высокого напряжения на катоде магнетрона.
5. Просмотреть форму и длительность импульса тока пучка электронов с коллектора ускоренного тока.
6. Просмотреть форму и длительность импульса с датчика ускоренного тока электронов.
7. Зарисовать эпюры напряжений.
8. Снять зависимости тока пучка на последней орбите от величины магнитного поля, тока накала катода, мощности ВЧ – генератора.
Все полученные результаты обработать и сделать выводы по каждой зависимости. В отчет по работе включить ответы на контрольные вопросы.

2.10. Контрольные вопросы

1. Вывести формулы 12 и 13.

2. Почему микротроны работают в импульсном режиме?
3. Чем определяется максимальный ускоренный ток микротрона и максимальная энергия ускоренных электронов?
4. Какие способы инжекции используются в современных микротронах?
5. Возможно ли ускорение в микротроне тяжелых частиц?
6. Пояснить работу схемы на рис. 6.
7. Оцените значение $E_{НАЧ}$ для данного ускорителя.

2.11. Список литературы

1. Капица С.П., Мелехин В.Н. Микротрон. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 211 с.
2. Капица С.П. Вестник АН СССР, 10 (1961). – С. 65.
3. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. – М.: Атомиздат, 1975.

3. БЕТАТРОН

3.1. Принцип действия бетатрона

Индукционные ускорители электронов – бетатроны применяются в медицине, в активационном анализе, в дефектоскопии. При этом большинство используемых бетатронов являются источниками тормозного излучения. Вместе с тем существует потребность и в применении электронных пучков, выведенных из бетатронов и сформированных определенным образом.

Известно, что индукционный метод ускорения, применяемый в бетатроне, основывается на законе электромагнитной индукции – *всякий изменяющийся во времени магнитный поток индуцирует в окружающем пространстве вихревое электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями*. Если электроны будут совершать в вихревом электрическом поле циклические движения, то под действием электрической силы, совпадающей по направлению с движением электронов, энергия электронов будет постоянно возрастать. Для того чтобы заставить электроны осуществлять циклические движения по замкнутой равновесной орбите применяется переменное управляющее магнитное поле, а вихревое электрическое поле создается изменяющимся во времени магнитным потоком, заключенным внутри орбиты.

Чтобы равновесная орбита в бетатроне представляла собой фиксированную окружность постоянного радиуса необходимо выполнение *бетатронного соотношения*, заключающегося в том, что *в любой момент времени ускорения частиц магнитное поле на равновесной орбите должно быть в два раза меньше среднего магнитного поля*

внутри орбиты. В этом случае увеличение энергии частиц будет синхронно следовать за увеличением магнитного поля на орбите.

Во время ускорения электроны проходят огромный путь в ускорительной камере, подвергаясь всевозможным возмущениям, как под воздействием неоднородностей магнитного поля, так и благодаря рассеянию на молекулах остаточного газа. Для устойчивого движения электронов по равновесной орбите необходимо, чтобы магнитное поле было спадающим по радиусу. Распределение магнитного поля бетатрона около равновесной орбиты радиусом r_0 обычно описывают в виде зависимости

$$B_z = B_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^n, \quad (3.1)$$

где: B_0 – индукция на равновесной орбите радиусом r_0 .

При этом для обеспечения поперечной устойчивости электронов на равновесной орбите **показатель спада магнитного поля**

$$n = -\frac{\partial B_z}{\partial r} \cdot \frac{r}{B_z} \quad (3.2)$$

должен находиться в пределах от **нуля** до **единицы**, то есть $0 < n < 1$. Такое поле обеспечивается особой формой полюсных наконечников, при которой воздушный зазор увеличивается от центра к периферии. При таком профиле силовые линии магнитного поля выгибаются наружу, создавая **бочкообразное** поле.

После достижения электронами определенной энергии они с помощью специальных устройств либо сбрасываются на мишень для получения тормозного излучения, либо выводятся наружу.

Применяют три основных схемы питания обмоток электромагнита: схему с использованием переменного синусоидального тока промышленной или повышенной частоты, схему с дополнительным подмагничиванием постоянным током и схему импульсного питания. На рис. 3.1 показана электрическая схема питания обмоток электромагнита от источника синусоидального тока промышленной частоты. Из-за значительной индуктивности обмотки электромагнита питание ее переменным током связано с низким значением $\cos \varphi$. Для повышения $\cos \varphi$ используется резонансная схема питания обмоток электромагнита. Эта схема включает намагничивающие обмотки, в цепь которых параллельно вводится конденсаторная батарея. Емкость конденсаторов подбирается так, чтобы собственная частота полученного колебательного контура равнялась частоте питающего тока.

От источника переменного тока с напряжением 380/220 В напряжение подается на автотрансформатор Ат, служащий для настройки контура в резонанс. Минимальному току в первичной намагничивающей обмотке соответствует максимальная компенсация реактивной мощности. Показания амперметра при полном резонансе определяются током,

обусловленным мощностью потерь в железе и меди электромагнита, а также в конденсаторах компенсационной батареи. С помощью автотрансформатора регулируют энергию ускоренных электронов от максимального значения до возможного минимума.

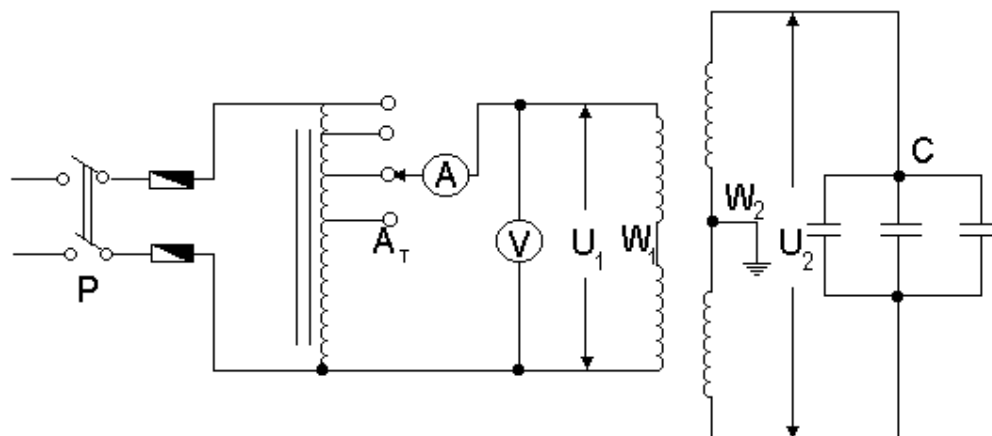


Рис. 3.1. Схема силового питания от промышленной сети

Увеличение частоты питания сопровождается ростом количества ускоренных электронов в единицу времени и повышением интенсивности излучения. Сокращение длительности излучения при повышенной частоте уменьшает общую длину пути электрона в камере и число столкновений с молекулами воздуха. С другой стороны, с ростом частоты возрастают потери в железе и меди электромагнита и конденсаторах. Усложняется также синхронизация работы отдельных узлов и схем ускорителя.

Более экономически совершенной работу ускорителя можно сделать, если изменить схему питания путем подмагничивания постоянным током обмотки электромагнита. Такое усовершенствование создает в воздушном зазоре дополнительный постоянный магнитный поток. При инъекции электронов на равновесной орбите должно существовать вихревое поле достаточно высокой напряженности. Исходя из этого, было найдено, что максимальное значение напряженности постоянного магнитного поля не должно превышать 98 % амплитуды переменной составляющей. На рис. 3.2, а показана напряженность поля на орбите H_0 и среднее поле внутри орбиты \bar{H} для бетатрона, работающего в обычном режиме, а на рис. 3.2, б – для того же бетатрона в случае, когда используется подмагничивание постоянным током. Благодаря тому, что пространственное распределение поля остается при подмагничивании таким же, как и без него, равновесная орбита остается на прежнем месте. Напряженность вихревого электрического поля на орбите понижается, так как уменьшилась скорость изменения магнитного потока. Одно-

временно увеличивается время ускорения. Следовательно, при подпитке обмоток электромагнита постоянным током уменьшается прирост энергии электронов за один оборот и увеличивается общее число оборотов. Общая энергия, приобретенная за цикл ускорения, при подмагничивании остается такой же, как и без него.

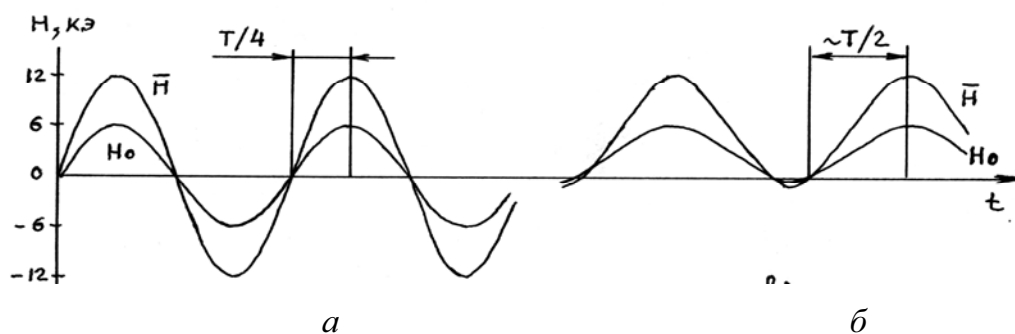


Рис. 3.2. Магнитное поле на орбите H_0 и среднее поле H при питании магнита переменным током (а) и при использовании подмагничивания постоянным током (б)

Уменьшение почти вдвое амплитуды переменного магнитного потока при подмагничивании приводит к понижению потребляемой мощности из-за потерь в железе и конденсаторной батарее. С другой стороны, появляются дополнительные потери в цепях постоянного тока, что приводит в общем случае к одинаковому значению потерь в меди как при подмагничивании, так и без него. Общие же потери мощности в батарее с подмагничиванием значительно меньше, чем в обычном.

На рис. 3.3 показана возможная схема смешанного питания.

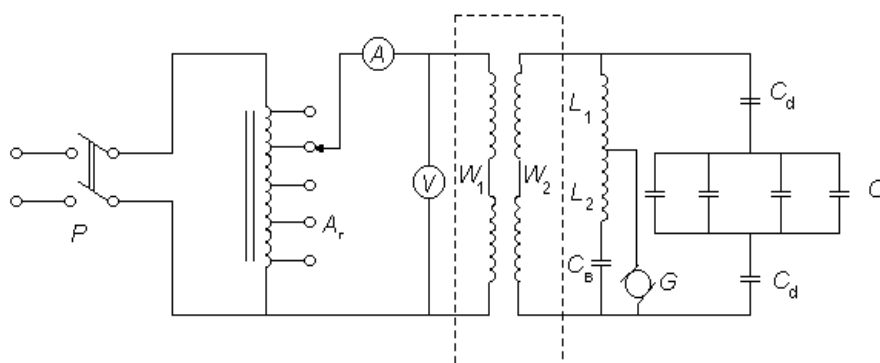


Рис. 3.3. Схема силового питания электромагнита с подмагничиванием

Необходимое дополнительное оборудование, связанное с подпиткой постоянным током, состоит из генератора постоянного тока G , реактора $(L_1 + L_2)$, блокировочного конденсатора C_b и конденсаторов C_d .

Наиболее громоздким и дорогостоящим элементом схемы является реактор $(L_1 + L_2)$. Реактор пропускает постоянную составляющую и ог-

раничивает переменную составляющую тока в цепи. Чтобы нейтрализовать отстающий по фазе ток, возникающий в связи с наличием реактора, вводится конденсатор C_d . Для уменьшения величины переменного тока, протекающего через генератор постоянного тока, часть витков реактора соединяется параллельно с генератором. Кроме этих витков реактора параллельно с источником постоянного тока включается также небольшой блокировочный конденсатор C_b , который позволяет скомпенсировать емкостной ток при помощи небольшой индуктивности части реактора.

При использовании импульсного питания существенно уменьшается потребляемая электромагнитом энергия, снижается тепловая нагрузка на электромагнит.

3.2. Бетатрон МИБ-6Э

Бетатрон МИБ-6Э представляет собой ускоритель с азимутальной вариацией поля и выводом электронного пучка. Максимальная энергия ускоряемых электронов составляет 6 МэВ. Управление энергией ускоренных электронов осуществляется с пульта управления бетатрона. Азимутальная вариация поля достигается путем применения специальных радиально-гребневых полюсов. Гребневые полюса имеют промежутки (впадины), не заполненные железом. Поля рассеяния гребневых полюсов за пределами ускорительной камеры уменьшены в связи с наличием впадин на 15–20 % по сравнению с азимутально-однородными. В момент вывода пучка из камеры бетатрона траектории частиц проходят в более ослабленном краевом поле бетатрона. Кроме того, применение азимутальной вариации увеличивает фокусирующие силы поля бетатрона, что приводит к уменьшению сечения пучка во время ускорения и его вывода за пределы магнитного поля. Расширяется область устойчивого движения пучка – можно применять поле с показателем спада n близким к нулю. Кроме того, движение устойчиво и на радиусах, близких к наружному краю полюса, т. е. там, где $n=1$.

Схема импульсного питания электромагнита бетатрона МИБ-6Э

Формирователь импульсов тока в электромагните собран по традиционной схеме типа «конверт» (рис.3.4), где формирование импульсов тока заключается в искусственном скачкообразном переводе тока из цепи тиристоров T_1, T_2 прямой ветви в цепь диодов T_3, T_4 обратной ветви (напомним, что тиристор является по сути дела управляемым диодом). При этом происходит изменение знака напряжения на индуктивной нагрузке L (обмотке электромагнита, которая состоит из двух частей, намотанных на верхний и нижний полюса электромагнита бетатрона) и изменение тока в накопительном конденсаторе C за счет чего конденсатор перезаряжается с той же полярностью, что и разряжался, т. е. про-

исходит возврат энергии, накопленной в индуктивности L , в емкостной накопитель C .

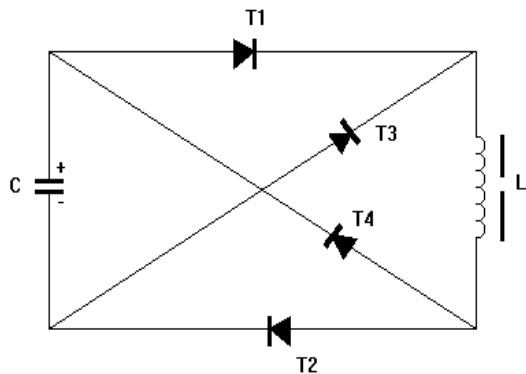


Рис. 3.4. Формирователь импульсов тока типа «конверт»

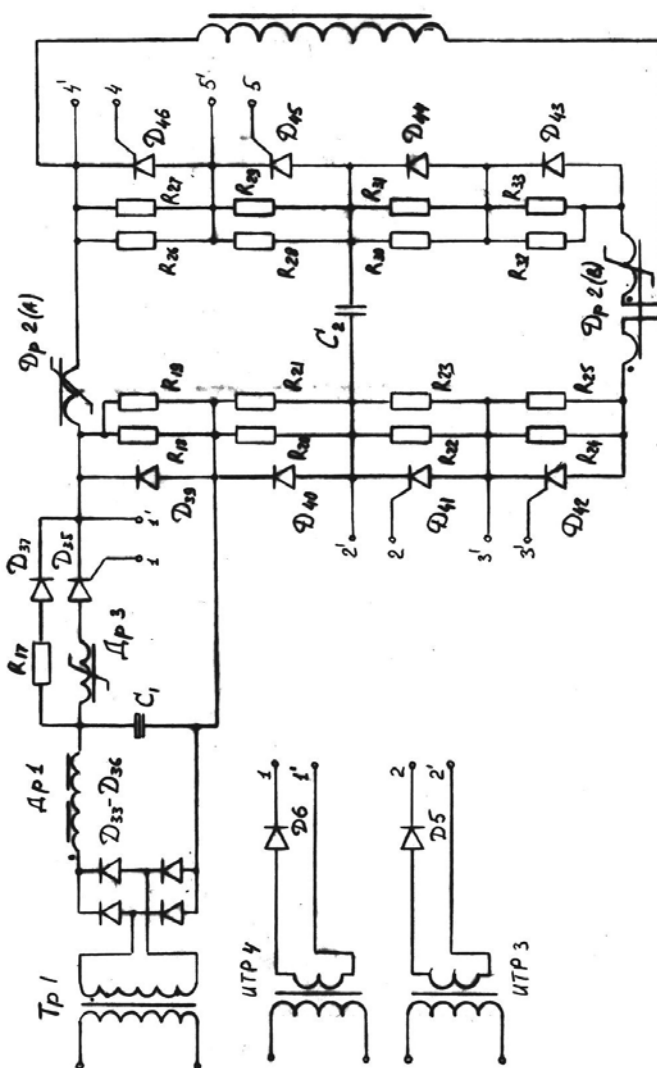


Рис. 3.5. Схема импульсного питания электромагнита бетатрона

Принципиальная схема импульсного питания электромагнита бетатрона показана на рис. 3.5. Схема состоит из выпрямителя, собранного на диодах $D_{33} - D_{36}$, сглаживающего дросселя Dr_1 и емкостного фильтра C_1 . Цепь тиристоров $D_{41}, D_{42}, D_{45}, D_{46}$ составляет прямую ветвь силового контура схемы, а цепь диодов $D_{39}, D_{40}, D_{43}, D_{44}$ — обратную ветвь схемы. Ввод энергии в контур для компенсации потерь осуществляется импульсным путем с помощью тиристора D_{35} , скорость нарастания тока в котором затягивается с помощью дросселя Dr_3 . Критерием ввода энергии в контур служит величина потерь энергии в системе. Резисторы $R_{18} - R_{33}$ служат для выравнивания напряжений на тиристорах и диодах.

Рассмотрим работу схемы питания обмотки электромагнита (рис. 3.5). В начальный момент времени происходит за-

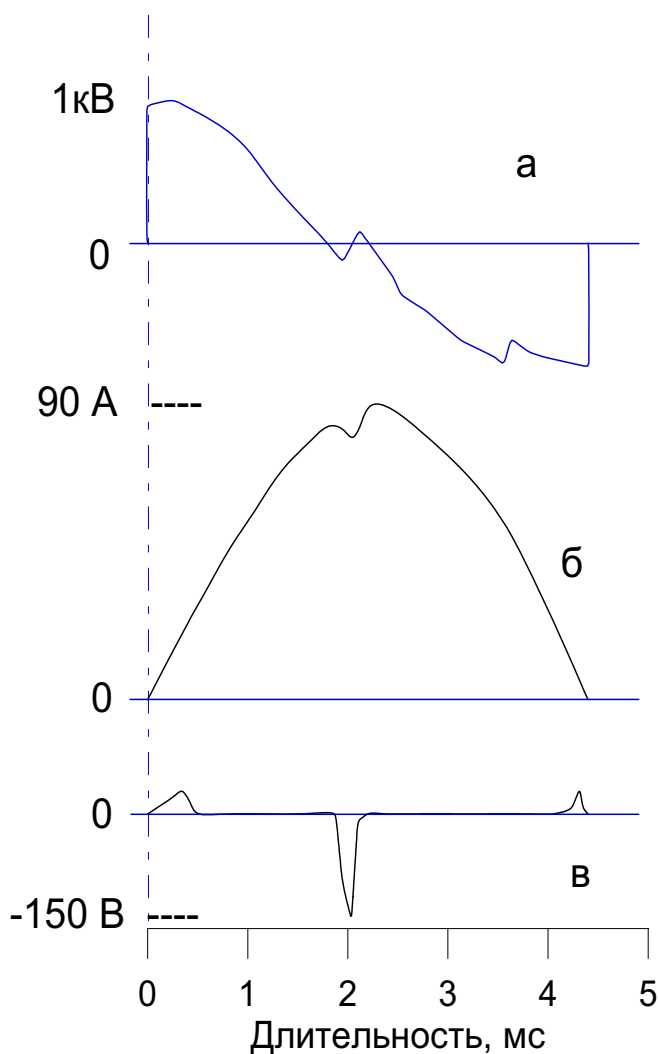


Рис. 3.6. Осциллограммы импульсов:
 а – напряжение на обмотке электромагнита,
 б – тока в обмотке электромагнита,
 в – напряжения на обмотке коммутирующего дросселя

ряд емкости фильтра C_1 через выпрямительные диоды $D_{33} - D_{36}$ и сглаживающий дроссель $Др1$. Одновременно через резистор R_{17} , диод D_{37} , $Др2(A)$ правую ветвь обмотки дросселя $Др2(B)$, индуктивность L обмотки электромагнита и цепь диодов D_{43}, D_{44} происходит заряд емкости C_2 до начального напряжения. С приходом управляющего импульса с пульта управления бетатрона на первичную обмотку импульсного трансформатора ИТРЗ, со вторичной обмотки импульсного трансформатора ИТРЗ, которая представляет из себя 4 параллельных и изолированных друг от друга обмотки (на рис. 3.5 это не показано), положительный сигнал через диод D_5 (и три других аналогичных диода) поступает на управляющие электроды (2,2'; 3,3'; 4,4'; 5,5') тиристоров $D_{41}, D_{42}, D_{45}, D_{46}$. Ёмкость C_2 начинает разря-

жаться через индуктивность L обмотки электромагнита. Возникает передний фронт импульса тока в обмотке L . При этом ток, протекающий через левую ветвь коммутирующего дросселя $Др2(B)$, производит его переманчивание. Напряжение на индуктивности L падает от максимального значения до минимального и достигает небольшого отрицательного значения. В результате переманчивания коммутирующего дросселя $Др2(A, B)$ и разряда ёмкости C_2 тиристоры $D_{41}, D_{42}, D_{45}, D_{46}$ закрываются (запираются под действием отрицательного потенциала на аноде, возникшего в результате переманчивания дросселя) и ток перехватывается в цепь диодов $D_{39}, D_{40}, D_{43}, D_{44}$ не меняя своего направления в обмотке индуктивности L . Происходит рекуперация энергии,

накопленной в индуктивности L , в емкостной накопитель C_2 . Зарядка ёмкости C_2 через диоды $D_{39}, D_{40}, D_{43}, D_{44}$ происходит при той же полярности, как и при разрядке через тиристоры. Ток через индуктивность L не меняет своего направления и образует задний фронт импульса. Дроссель Др2(А) и Др2(В) через правую ветвь вновь перемагничивается. Напряжение на индуктивности L в момент перехвата тока из тиристоров в цепь диодов при перемагничивании дросселя скачком возрастает до небольшого положительного значения, а затем вновь принимает отрицательное значение и далее падает до максимального отрицательного значения за время, определяемое значениями емкости C_2 и индуктивности L . Когда напряжение на индуктивности L принимает отрицательное значение, а ток в обмотке L начинает спадать, на первичную обмотку импульсного трансформатора ИТР4 поступает сигнал с пульта управления бетатрона. Сигнал с вторичной обмотки трансформатора через диод D_6 поступает на управляющий электрод тиристора D_{35} (точки 1,1'). Тиристор открывается и часть энергии, накопленной в ёмкости C_1 , поступает в систему, восполняя потери энергии в контуре. Сигналом для включения тиристора D_{35} в определенный момент времени служит необходимый уровень величины магнитного поля в рабочей области межполюсного пространства электромагнита бетатрона. После зарядки конденсатора C_2 до первоначального уровня и уменьшения тока в обмотке до нуля диоды $D_{39}, D_{40}, D_{43}, D_{44}$ и тиристор D_{35} закрываются.

Характер изменения напряжения и тока в обмотке электромагнита, а также изменение напряжения на коммутирующем дросселе показаны на рис. 3.6. Форму импульса напряжения на обмотке электромагнита во время работы схемы можно наблюдать на экране осциллографа, если на его вход подать сигнал с витка, намотанного на стойку или полюс электромагнита (рис. 3.6, а). На рис. 3.6, в показана форма импульса напря-

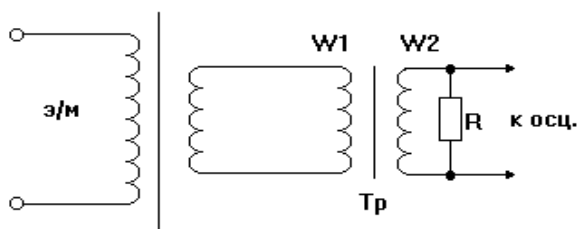


Рис. 3.7. Схема трансформатора тока

жения на обмотке коммутирующего дросселя. Ток в электромагните L (величина тока находится в пределах 90-150 А) точно можно измерить, установив шунт в разрыв обмотки L . Форма импульса тока приведена на рис. 3.6, б. Применение шунта для измерения тока требует заземления одной из точек высоковольтной части схемы,

что довольно небезопасно. Поэтому в данном случае для рассмотрения характера изменения тока в обмотке L используется трансформатор то-

ка, принципиальная схема которого показана на рис. 3.7. Для подсоединения трансформатора тока используется виток со стойки или полюса электромагнита бетатрона. Данная схема передает качественно форму импульса тока в обмотке электромагнита.

3.2.2. Вывод электронного пучка

Существует несколько методов вывода электронного пучка из ускорительной камеры бетатрона. В данном бетатроне вывод пучка электронов осуществляется с помощью секторной смещающей обмотки, которая располагается над и под ускорительной камерой (рис. 3.8). Витки обмотки вывода соединены последовательно и подключены к генератору импульсов тока вывода. В момент вывода электронного пучка по виткам обмотки пропускается импульс тока длительностью $t=50$ мкс, амплитудой 150 А. В результате взаимодействия пучка с импульсным полем обмоток вывода, ослабляющим управляющее поле бетатрона, частицы совершают колебания и выходят из-под действия фокусирующих сил магнитного поля в краевое поле бетатрона и образуют выводимый пучок. Регулировка энергии электронов осуществляется изменением фазы задержки импульса тока в обмотках вывода.

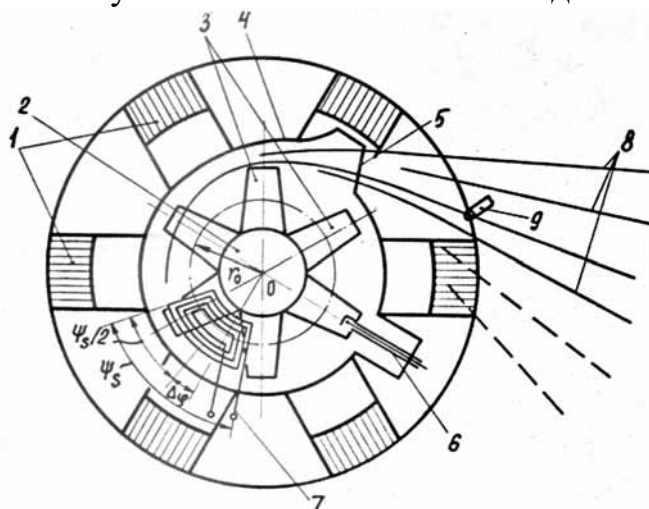


Рис. 3.8. Схема вывода электронного пучка из бетатрона МИБ-6 с азимутальной вариацией поля:

- 1 – стойка обратного магнитопровода; 2 – центральный сердечник полюса;
- 3 – радиальные гребни полюса; 4 – отпаянная ускорительная камера;
- 5 – отдутие в стенке камеры для вывода пучка; 6 – инжектор;
- 7 – секторная обмотка вывода (смещения); 8 – траектории частиц выводимого пучка; 9 – ионизационная камера

Формирование импульса тока короткой длительности и значительной амплитуды осуществляется с помощью специального генератора, принципиальная схема которого показана на рис. 3.9. Особенность схе-

мы данного генератора заключается в том, что электрическое питание осуществляется от специальной обмотки, намотанной на одном из полюсов электромагнита бетатрона.

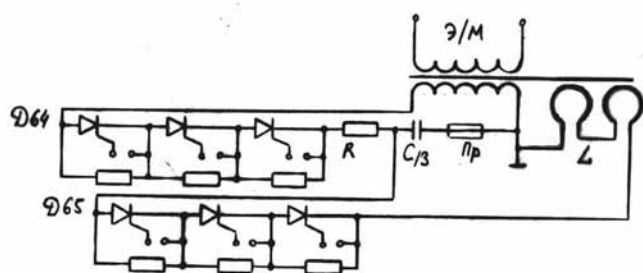


Рис. 3.9. Генератор импульсов тока в обмотке вывода пучка

При работе схемы импульсного питания бетатрона с данной обмотки снимается высокое напряжение (700–1000 В) и через диоды D_{64} (в качестве которых могут применяться тиристоры с управлением от пульта ускорителя), зарядное сопротивление R

происходит заряд ёмкости C_{13} . Данный процесс зарядки осуществляется на спадающем фронте импульса тока в обмотке электромагнита бетатрона, т. е. на отрицательной полуволне напряжения на электромагните (рис. 3.6 а, б), чтобы не создавать помехи нормальному процессу ускорения электронов до необходимой энергии на переднем фронте импульса тока в электромагните. При достижении электронами необходимой величины энергии на тиристоры D_{65} со схемы управления бетатрона поступают запускающие импульсы. Ёмкость C_{13} начинает разряжаться через тиристоры D_{65} и обмотку вывода пучка L (этот процесс происходит на переднем фронте импульса тока в обмотке электромагнита). В обмотке возникает импульс тока амплитудой порядка 60–160 А и длительностью 20–50 мкс (параметры зависят от числа витков в обмотке вывода пучка, размеров обмотки, т. е. от её индуктивности, и ёмкости конденсатора C_{13}). При работе схемы вывода пучка возникает электромагнитное поле, импульс наводки от этого поля хорошо различим на осциллограмме напряжения, снимаемого с витка, намотанного на электромагнит бетатрона.

Дополнительное магнитное поле, создаваемое обмоткой вывода пучка, нарушает устойчивое движение электронов по равновесной орбите, раскачивает радиальные колебания и приводит к выводу пучка. Далее пучок попадает в тракт формирования, фокусируется квадрупольными линзами и выпускается наружу. Чтобы определить амплитуду и длительность тока в обмотке вывода пучка достаточно в разрыв обмотки вывода L вставить шунтирующее малоиндуктивное сопротивление величиной $\sim 0,01\text{--}0,1$ Ом.

3.2.3. Инжекция электронов

Источником электронов служит простейший двухэлектродный инжектор с прямонакальным катодом и заземленным анодом (пушка Керста), встроенный внутрь ускорительной камеры.

По своему принципу действия генератор схемы инъекции подобен генератору схемы вывода пучка. Здесь также питание осуществляется от обмотки, намотанной на полюсе электромагнита бетатрона. Таким же образом происходит заряд емкости и её разряд по сигналам с пульта управления. Отличие заключается в том, что инжестирование электронов в камеру ускорителя происходит в самом начале работы схемы импульсного питания электромагнита бетатрона, когда только начинается формироваться передний фронт импульса тока в электромагните. В этот момент магнитное поле ускорителя уже имеет определенную величину и поэтому инжеструемые электроны должны уже обладать довольно высокой начальной энергией, чтобы произошел их успешный захват в ускорение. Сам захват электронов в ускорение происходит за несколько оборотов электронов в камере ускорителя, т. е. за достаточно малое время. Для придания инжеструемым электронам начальной энергии разность потенциалов между катодом и анодом инжектора должна быть не менее 20–40 кВ, а длительность импульса должна составлять несколько микросекунд. Чтобы получить столь короткую длительность импульса высокого напряжения в схеме генератора инъекции используется специальный импульсный трансформатор, через первичную обмотку которого пропускается ток разряда ёмкости схемы инъекции (в схеме инъекции вместо индуктивности L вставлена первичная обмотка импульсного трансформатора). В импульсном трансформаторе имеется специальная обмотка, которая одновременно обеспечивает непрерывный накал катода инжектора. Импульсный трансформатор инъекции заключен в герметичный изолированный корпус, который заполнен трансформаторным маслом, а высоковольтные выводы к инжектору изготовлены из органического стекла с целью предупреждения возможных пробоев высокого напряжения на заземленный корпус. Управление накалом инжектора также осуществляется с пульта управления бетатроном. Длительность импульса и величину амплитуды высоковольтного напряжения можно измерить с помощью резисторного делителя напряжения (1:1000), подключаемого к высоковольтному выходу импульсно-

го трансформатора, если сигнал с меньшего сопротивления делителя подать на вход осциллографа.

3.2.4. Ускорительная камера

Ускорительная отпаянная стеклянная камера, которая помещается между полюсами электромагнита, имеет два патрубка и припаянный к ней электропровод. В одном патрубке установлен инжектор электронов. Этим патрубком через маслonaполненный резиновый шланг камера соединяется с высоковольтным блоком, включающим высоковольтный импульсный и накальный трансформаторы, которые размещены в корпусе, залитом маслом. Высоковольтный блок снимается и устанавливается в электромагнит только вместе с камерой. В другом патрубке установлен геттер и вывод проводящего покрытия камеры. С помощью геттера можно восстановить вакуум в камере, если он ухудшился.

Камера выполнена совместно с электропроводом, который выполняет функцию формирования и вывода пучка в нужном направлении. Электропровод представляет собой стеклянный цилиндр с отпаянным наконечником. На внешней поверхности электропровода ближе к передней его части, которая стыкуется с камерой, закреплены 3 квадрупольные линзы. Размеры двух крайних линз вдоль поверхности электропровода в два раза меньше размера средней линзы в этом же направлении. Линзы состоят из полюсов магнитопровода и обмоток возбуждения. Питание обмоток возбуждения линз осуществляется тремя стандартными блоками питания с напряжением 6,3 В и током 1,5–2 А. Средняя линза фокусирует пучок в вертикальной плоскости, а две крайние – в плоскости равновесной орбиты.

3.2.5. Пульт управления

Работой бетатрона управляют с помощью пульта, который располагается в отдельной комнате. Пульт управления содержит следующие функциональные узлы (рис. 10):

- генератор импульсов запуска блока силового питания;
- схему стабилизации энергии;
- схемы задержки инжекции и вывода;
- формирователи импульсов запуска генераторов инжекции и вывода;
- измерители энергии и тока инжекции;
- блок питания пульта.

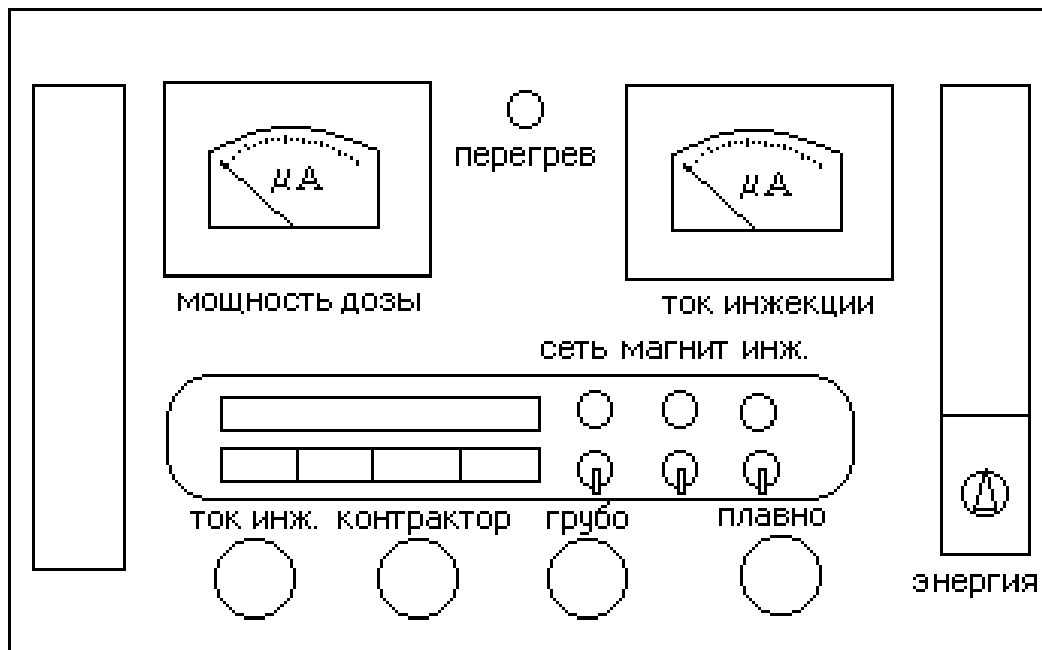


Рис. 3.10. Пульт управления МИБ-6Э

На панели пульта управления расположены:

- переключатель уровня энергии, который позволяет дискретно менять энергию ускоренных электронов путем изменения времени смещения;
- тумблеры включения напряжения сети, питания электромагнита и напряжения инжектора. Каждое включение сигнализируется цветовой сигнальной лампочкой;
- линейный газоразрядный индикатор уровня напряжения сети и кнопочный переключатель выбора используемого напряжения сети 110 В, 127 В, 220 В и 240 В;
- ручка плавного регулирования тока инжекции и микроамперметр для контроля энергии и тока инжекции;
- переменные резисторы для регулировки мощности дозы «грубо» и «точно»;
- переменный резистор для регулировки контрактора;
- справа на передней панели в нише, закрытой декоративной сеткой, установлен выходной разъем пульта, переменный резистор регулировки энергии;
- в центре между микроамперметрами установлена сигнальная лампочка «перегрев», сигнализирующая о срабатывании термореле, которое отключает питание электромагнита при его перегреве.

3.3. Экспериментальная установка

3.3.1. Состав установки

Установка (рис. 3.11) включает источник излучения – бетатрон, наперстковую ионизационную камеру 3, установленную на подвижной платформе 8,двигающейся пошагово в радиальном направлении относительно пучка излучения, координатное устройство 7, ионизационную камеру 2, используемую в качестве монитора, дозиметр 4, преобразователь ток – напряжение 10, два АЦП 5, один ЦАП 9 для управления механизмом перемещения координатного устройства, ЭВМ 6. Дозиметром 4 типа VA-J-18 измеряют мощность дозы выводимого потока электронов из электронопровода ускорительной камеры. В качестве детектора используется прутковая (напёрстковая) ионизационная камера. С помощью этой камеры дозиметром можно измерять мощность дозы от 30 мр/ч до 33300 р/мин. Возникающий в камере под действием излучения ионизационный ток измеряется усилителем тока.

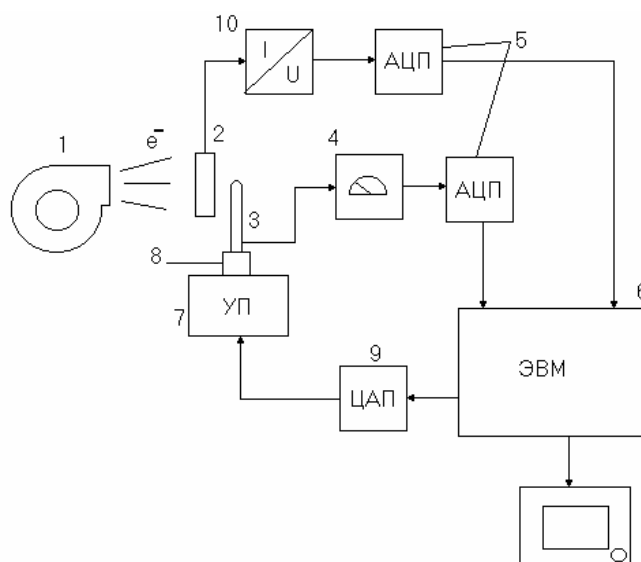


Рис. 3.11. Блок-схема установки

Диапазон измерения тока $2,4 \cdot 10^{-12} - 8 \cdot 10^{-9}$ А. В качестве усилителя тока используется усилитель с динамическим конденсатором. Такой усилитель обладает высокой чувствительностью, широким диапазоном измерения и малым дрейфом нулевого уровня.

Усиление производится путем модуляции входного сигнала от приводной системы преобразователя и подачи его на усилитель. Частота вибрации виброконденсатора 480 Гц. Возникающее на измерительных сопротивлениях постоянное напряжение преобразуется виброконденсатором в пропорциональное переменное напряжение, которое усиливает-

ся в транзисторном малошумящем селективном усилителе, затем демодулируется в фазочувствительном выпрямителе и поступает на показывающий прибор.

Излучение бетатрона 1 попадает на ионизационную камеру 2 и наперстковую ионизационную камеру 3. С ионизационной камеры 2 сигнал через преобразователь 10 «ток – напряжение» поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой код и передает код на ЭВМ. В свою очередь, сигнал с наперстковой ионизационной камеры поступает на дозиметр 4, с выхода которого через усилитель сигнал поступает на второй АЦП, который также передает сигнал в цифровой форме на ЭВМ.

Наперстковая камера 3 установлена на подвижной платформе 8 устройства протяжки 7. Движение платформы обеспечивается в пределах 42 см поперек пучка излучения, причем движение обеспечивается с шагом, равным 2,5 мм. Устройство протяжки изготовлено на базе цифрового печатающего устройства. Устройство управляется сигналами, поступающими на него с ЭВМ через цифроаналоговый преобразователь 9.

Ионизационная камера 2, в отличие от наперстковой 3, установлена неподвижно. Чтобы уменьшить воздействие флуктуаций излучения на точность измерения сигнала вычисляется отношение сигнала с наперстковой ионизационной камеры 3 к сигналу с ионизационной камеры 2.

3.3.2. Работа с дозиметром

Перед включением нажать кнопку «ноль» выключателя «коэффициент F2». Нажать выключатель «Сеть». По истечению 2 мин дозиметр готов к проведению измерения. Привести выключатель F1 в положение I. При нажатой кнопке «ноль» вход дозиметра замкнут накоротко и можно провести коррекцию нулевой точки с помощью отвертки на регуляторе «N».

Ионизационная камера закрепляется на штативе и фиксируется непосредственно на месте измерения. Прутковая (наперстковая) камера является воздухоэквивалентной ионизационной камерой, предназначенной для измерения дозы и мощности дозы. Её чувствительный ее объем равен 50 мм^3 . Материал электродов – воздухоэквивалентная смесь. Чувствительность при нормальных условиях – $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ А} \cdot \text{мин/рентг.} \pm 3 \%$. Диапазон измерения мощности дозы 0–333, 1000, 3330, 10000, 33300 рентг/мин. Конструктивно камера выполнена в виде прутка длиной 25 см, на который натянут пластмассовый шланг.

При проведении измерений следует учитывать, что кабель в небольшой степени тоже чувствителен к облучению. Этот эффект зависит от облучаемой длины кабеля и может составлять при длине 10 см до 4 % измеренной дозы.

Значение измеряемой величины получают путем простого умножения трех коэффициентов и значения показывающей шкалы:

$$F_k \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_{\text{шк}} = P \text{ р/мин.},$$

где: $F_k = 3,33$ – коэффициент для прутковой камеры;

F_1 – переключатель 10;

F_2 – кнопочный выключатель «коэффициент F_2 » 8;

$F_{\text{шк}}$ – показания стрелочного прибора.

Для прутковой камеры предельное значение диапазона измерения 3000 р/мин или 3000 р.

3.3.3. Программа *move.for*

Программа *move.for* предназначена для обработки сигналов от двух источников и записи полученных данных на диск. После запуска программы на экране появляется меню следующего вида:

- 1 – перемещение в заданную точку;
- 2 – настройка в одной точке;
- 3 – снятие временной зависимости;
- 4 – автоматическое измерение;
- 5 – выход.

1. Перемещение в заданную точку

При выборе этого пункта на экране появится вопрос: «Номер позиции?». При этом следует ввести номер позиции платформы устройства протяжки. Всего этих позиций 169, включая начальную (т. е. от 0 до 168). Это составляет 42 см, по 1 перемещению на 0,25 см.

2. Настройка в одной точке

Выбор данного пункта позволяет настроить излучение бетатрона на наперстковую ионизационную камеру. На экране появляются поочередно сменяющие друг друга значения измеренных сигналов с наперстковой и обычной ионизационных камер. Подстройкой излучения бетатрона следует добиться максимального значения мощности дозы.

3. Снятие временной зависимости

После настройки излучения бетатрона, описанного выше, можно снять характеристику изменения мощности дозы от времени $P = f(t)$ в статике. Всего измерений производится 100 с частотой 1 измерение в секунду. После окончания измерений программа запрашивает имя файла для записи данных на диск. Файл имеет следующий формат:

t U
.....
.....

Здесь t – время с момента начала измерений в секундах, U – величина сигнала с наперстковой ионизационной камеры в вольтах.

4. Автоматическое измерение

При выборе данного пункта платформа устройства протяжки устанавливается в начальное положение. Затем происходит последовательное измерение сигналов с ионизационных камер, платформа устройства протяжки при этом проходит от своего начального до конечного положения. После окончания измерений программа запрашивает имя файла, в который записываются данные. Файл имеет следующий формат:

```
STEP L U0 U1 U1/U0
```

```
.....
```

```
.....
```

Здесь STEP – номер шага (начиная с 0) от начального положения каретки; L – расстояние от начального положения каретки в см; U_0, U_1 – величина сигналов с обычной и наперстковой ионизационных камер в вольтах.

3.4. Лабораторная работа № 3

Цель работы

- Ознакомление с функциональным назначением и устройством узлов ускорителя МИБ-6Э;
- исследование режимов работы основных силовых схем и систем управления электронным пучком;
- измерение параметров выведенного электронного пучка.

Задание 1. Исследование режимов работы ускорителя

1. Подключить шнур питания к сети и убедившись по газоразрядному индикатору пульта, что величина напряжения соответствует 220 В, включить тумблер «Сеть» пульта управления.
2. Через 3 минуты включить тумблер «Магнит», при этом должен заработать силовой контур питания электромагнита.
3. Через 10 сек. включить тумблер «Инжекция» и установить по микроамперметру ток инъекции ручкой плавной настройки на пульте.
4. Определить форму импульса и максимальную величину напряжения на намагничивающей обмотке по импульсу напряжения, снимаемого с витка, намотанного на стойку электромагнита ускорителя или на полюс. Принять во внимание, что число стоек обратного магнитопровода равно 6, а число витков в обмотке – 96.

5. С помощью трансформатора тока снять временную зависимость тока в обмотке электромагнита. Убедиться, что наводка от импульса в обмотке вывода перемещается по кривой тока при изменении энергии выводимых электронов.
 6. Измерить сигнал с шунта в цепи обмотки вывода. Определить длительность импульса тока в обмотке и, зная сопротивление шунта, амплитуду тока.
 7. Снять зависимость времени смещения (по осциллографу) от энергии электронов. При каждой энергии ручками «Мощность дозы», «Грубо», «Точно», «Контрактор» и переключателями тока фокусирующих линз добиться максимальных показаний регистрирующего пучок прибора.
 8. Подсоединить делитель к импульсному трансформатору схемы инжекции. С помощью осциллографа определить длительность и амплитуду импульса напряжения на инжекторе.
 9. Регулировкой тока в фокусирующих линзах добиться максимальных показаний дозиметра при разных энергиях электронов. Построить зависимость тока в линзах от энергии электронов.
- Все полученные результаты обработать и сделать выводы по каждой зависимости.

Помните, что Вы работаете на ускорителе, в котором имеется много высоковольтных систем. Поэтому необходимо соблюдать все меры по технике безопасности, в том числе и радиационной безопасности.

Задание 2. Измерение параметров выведенного электронного пучка

1. Включить в бункере блок питания бетатрона и устройства протяжки.
2. Последовательно включить тумблеры «Сеть», через 3 минуты «Магнит», через 10 секунд «Инжекция» на пульте управления. Установить ток инжекции 43 мкА.
3. Установить переключатель «Энергия» на нужное значение энергии (1–6 МэВ).
4. Запустить программу *move.exe*.
5. Выбрать в меню программы п. 1 и вывести платформу устройства протяжки в среднее положение (шаг 84).
6. Добиться максимально возможного показания мощности дозы дозиметром путем поочередной регулировки резисторов «Мощность дозы», «Грубо», «Точно» и «Контрактор».
7. Выбрать в меню программы п. 3 и снять зависимость сигнала с ионизационной камеры от времени.

8. Ввести по запросу программы имя файла данных и сохранить полученные данные на диске.
9. Выбрать в программе п. 4 и произвести измерение радиального распределения излучения бетатрона при двух значениях энергии излучения.
10. По запросу программы ввести имя следующего файла данных и сохранить полученные данные на диске.
11. Произвести измерения по пунктам 12 и 13 для двух различных энергий излучения бетатрона.
12. С помощью графической программы GRAPHER построить на экране ЭВМ графики полученных зависимостей.
13. Распечатать полученные графики зависимостей $P_{1,2} = f(R)$ и $P = f(t)$.
14. По результатам полученных измерений сделать выводы по каждой зависимости.

3.5. Контрольные вопросы

1. Чем отличаются режимы ускорения в бетатронах с азимутально-симметричным магнитным полем и полем с азимутальной вариацией?
2. К каким следствиям приводит повышение частоты питания намагничивающей обмотки переменным синусоидальным током?
3. В чем преимущество системы силового питания с подмагничиванием постоянным током?
4. Почему применяются более сложные системы импульсного силового питания по сравнению с питанием от промышленной сети?
5. Какие применяются способы вывода электронного пучка из камеры бетатрона?
6. Почему выгодно повышать напряжение на инжекторе?
7. Как регулируется конечная энергия в бетатроне?

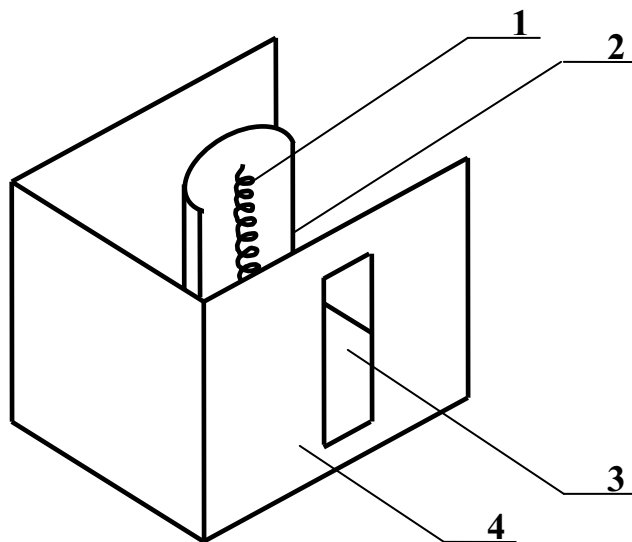
3.6. Список литературы

1. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 350 с.
2. Воробьев А.А., Кононов Б.А., Евстигнеев В.В. Электронные пучки бетатронов. – М. : Атомиздат, 1974. – 152 с.
3. Москалев В.А. Бетатроны. – М.: Энергоиздат, 1981. – 167 с.

4. ВВОД ЭЛЕКТРОНОВ НА РАВНОВЕСНУЮ ОРБИТУ (ИНЖЕКЦИЯ) И СМЕЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ОРБИТЫ В БЕТАТРОНЕ

4.1. Инжекция электронов

Источником электронов является инжектор, на который в определенный момент времени подается импульс напряжения, выбрасывающий электроны из инжектора. Используется так называемый инжектор Керста – простейшая миниатюрная двухэлектродная электронная пушка (рис. 4.1). Источником электронов является накаливаемая вольфрамовая спираль 1, покрытая окисью тория для увеличения тока эмиссии. Анодом служит заземленная коробочка 4 со стороной порядка 1 см и вертикальной прорезью 3 для выхода электронного пучка. Правая стенка коробочки отсутствует – здесь проходят проводники, по которым подается импульсное ускоряющее напряжение, и напряжение накала спирали. Электрод 2 служит для фокусировки электронного пучка. Нить накала 1 электрически соединена с фокусирующим электродом 2, т. е. обе эти детали находятся под высоким напряжением.



*Рис. 4.1. Устройство инжектора Керста
(верхняя стенка корпуса (анода) не показана):*

1 – нить накала, 2 – фокусирующий электрод (катод), 3 – прорезь для выхода пучка электронов, 4 – корпус инжектора (заземленный анод)

Инжекцию невозможно осуществить в момент времени, когда магнитное поле в междуполюсном зазоре проходит через нулевое значение. Азимутальная и радиальная фазовая неоднородность ведущего магнитного поля в этот момент недопустимо велика. В зависимости от величины этой не-

однородности существует минимальный промежуток времени после прохождения поля через нуль, когда становится возможным захват электронов на устойчивую орбиту. Поэтому ускоряющее напряжение на инжекторе зависит от времени начала инъекции. Кроме того, минимальная величина напряжения инъекции зависит от амплитуды магнитной индукции, т. е. с ростом энергии ускоренных электронов необходимое напряжение на инжекторе возрастает. Обычно оно должно быть не менее $(30 \div 50)$ кВ.

Расположение инжектора в ускорительной камере может быть различным: снаружи и внутри рабочей зоны, в плоскости равновесной орбиты и вне нее. Чаще инжектор располагают в плоскости орбиты на наружном радиусе рабочей зоны в точке, где показатель спада магнитного поля $n \approx 1$. Для получения тормозного излучения мишень ставят на тыльной стороне инжектора.

В любом случае не все электроны из инжектора захватываются в ускорение. Часть попадает на стенки ускорительной камеры, создавая объемный заряд. Для снятия этого заряда внутренняя поверхность камеры покрывается тонким проводящим слоем, который заземляется. Проводящий слой должен иметь сопротивление порядка $(5 \div 30)$ Ом, чтобы ток, возбуждаемый в нем переменным магнитным полем, был достаточно малым и не мог разрушить покрытие.

Синхронизация времени подачи импульса на инжектор с изменением магнитного поля осуществляется с помощью пермаллового датчика – пикера. Пикер представляет собой катушку с сердечником из быстро насыщающегося материала, в обмотке которой в момент насыщения сердечника, т. е. в момент прохождения поля через нулевое значение, генерируется пик напряжения.

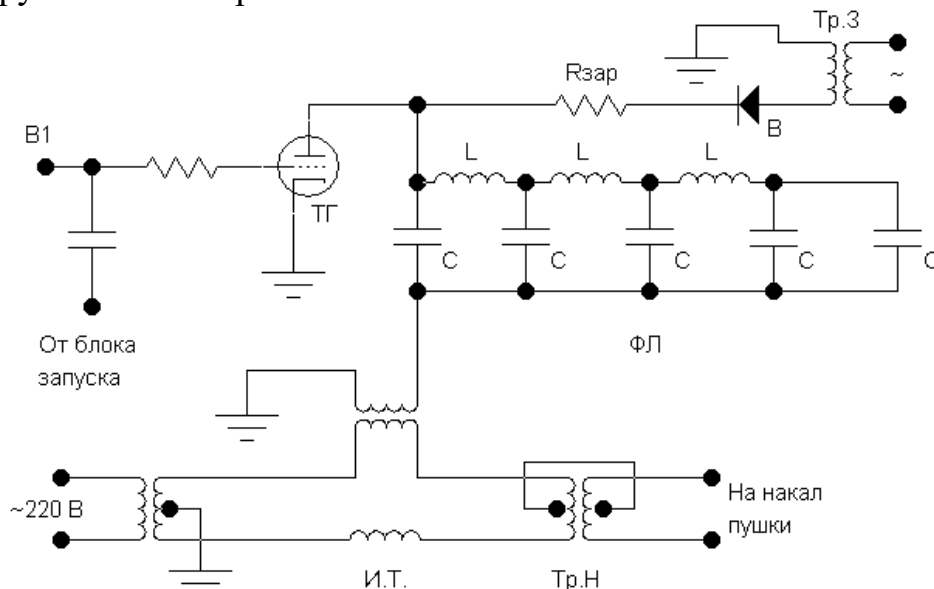


Рис. 4.2. Схема инъекции

Для кратковременной подачи высокого напряжения на инжектор используется импульсная схема – схема инъекции, показанная на рис. 4.2. Схема работает следующим образом. Зарядка конденсаторов C формирующей линии ФЛ производится положительной полуволной напряжения от высоковольтного зарядного трансформатора $Tr.3$ через вентиль B , зарядное сопротивление $R_{зар}$ и первичную обмотку импульсного трансформатора ИТ. Зарядное сопротивление $R_{зар}$ ограничивает зарядный ток величиной, допустимой для используемого вентиля B . В момент зарядки линии коммутирующий тиратрон ТГ заперт, так как на его сетку подано отрицательное смещение от выпрямителя $B1$. Затем, когда на аноде имеет место отрицательная полуволна напряжения, при подаче на сетку тиратрона ТГ управляющего импульса он открывается и происходит разряд формирующей линии через тиратрон и первичную обмотку импульсного трансформатора. Фаза инъекции регулируется задержкой во времени импульса с пикера с помощью специальной схемы задержки. Можно регулировать фазу и путем подпитки пикера постоянным током. Для обеспечения стабильной работы ускорителя должно быть выполнено важное требование – разброс срабатывания коммутирующего устройства по времени не должен превышать сотых долей микросекунды. Применяются водородные импульсные тиратроны ТГИ, позволяющие получать короткие импульсы тока большой амплитуды. Например, для тиратрона ТГИ1-325/16 (анодное напряжение 16 кВ) время пробоя составляет 25 нс.

Применение формирующей линии вместо одного конденсатора позволяет получить на инжекторе прямоугольный импульс напряжения. При разряде линии на сопротивление, равное волновому сопротивлению линии, на нагрузке (первичной обмотке импульсного трансформатора) формируется прямоугольный импульс напряжения с амплитудой, равной половине напряжения, до которого линия была заряжена. Конструкция обмоток импульсного трансформатора такова, что форма импульса напряжения на вторичной высоковольтной обмотке такая же, как и импульса напряжения, подаваемого на первичную обмотку. Применение симметричного импульсного трансформатора позволяет одновременно подавать на катод переменное напряжение накала, разогревающее его, и периодически высокий отрицательный потенциал. Вторичная обмотка такого трансформатора состоит из двух одинаковых параллельных ветвей.

После разряда конденсаторов формирующей линии через первичную обмотку импульсного трансформатора (время разряда – несколько мкс.) тиратрон запирается и через $1/2$ периода начинается вновь зарядка ФЛ.

4.2. Смещение электронов с равновесной орбиты

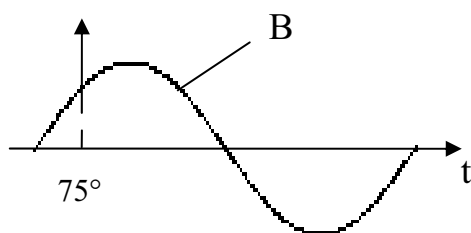


Рис. 4.3. Импульс магнитного поля смещающей катушки

Электрон, ускоренный в бетатроне, направляется либо на вольфрамовую мишень для получения пучка тормозного излучения, либо в устройство вывода их из ускорительной камеры. Чтобы сбросить электроны на мишень или в устройство вывода, которые находятся на большем радиусе, чем радиус равновесной орбиты R_0 , необходимо увеличить радиус окружности, по которой происходит ускорение электронов. Сброс электронов осуществляется тем или иным изменением в распределении магнитного поля в междуполусном пространстве бетатрона. Это изменение достигается за счет генерации импульса тока в смещающей обмотке, приводящей к возникновению дополнительного магнитного потока. Смещающая обмотка в зависимости от способа смещения имеет определенную геометрическую конфигурацию и располагается соответствующим образом в междуполусном пространстве бетатрона. Смещение электронов происходит при фазе $(75 \div 80)^\circ$ (рис. 4.3).

На практике могут быть использованы следующие методы смещения электронов с равновесной орбиты на мишень, находящуюся вне орбиты.

1. Дополнительное увеличение в конце ускорения магнитного потока в круге равновесной орбиты. Это приводит к увеличению среднего значения индукции в круге орбиты \bar{B} и, следовательно, к нарушению бетатронного условия $\bar{B} = 2B_0$. За счет вихревого электрического поля от дополнительного прироста магнитного потока внутри орбиты электроны приобретают добавочную энергию, радиус равновесных орбит увеличивается, и электроны попадают на внешнюю мишень. Приращение магнитного потока $\Delta\Phi$ в круге орбиты, необходимое для увеличения радиуса орбиты от R_0 до радиуса R_1 , на котором установлена мишень:

$$\Delta\Phi = 2\pi B_0 R_0^n \frac{2(1-n)}{2-n} (R_1^{2-n} - R_0^{2-n}), \quad (4.1)$$

где B_0 – поле на орбите с радиусом R_0 в момент сброса, n – показатель спада магнитного поля по радиусу. Если $\Delta R = R_1 - R_0 \ll R_0$, то из формулы (4.1) можно получить упрощенное расчетное соотношение:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \approx (1-n) \frac{\Delta R}{R_0}, \quad (4.2)$$

где $\Phi = 2\pi R_0^2 B_0$ – магнитный поток в круге орбиты в момент начала сброса. Обмотку смещения можно размещать либо непосредственно на галетах либо выше и ниже ускорительной камеры внутри орбиты.

2. Уменьшение магнитного поля на равновесной орбите и в ее окрестности. В этом случае энергия электронов остается практически постоянной, и увеличение радиуса орбиты происходит за счет ослабления магнитного поля в области равновесной орбиты. Смещающая обмотка состоит из двух равных частей, расположенных сверху и снизу ускорительной камеры. Изменение поля ΔB_0 , требуемое для увеличения радиуса от R_0 до R_1 , определяется выражением:

$$\Delta B_0 = B_0 \left[\frac{R_0}{R_1} - \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^n \right], \quad (4.3)$$

или приближенно при $\Delta R \ll R_0$:

$$\frac{\Delta B_0}{B_0} \approx -(1-n) \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (4.4)$$

3. Азимутальное нарушение поля на равновесной орбите. При этом способе равновесная орбита деформируется, т. е. приобретает форму, отличную от окружности. Мишень устанавливается на азимуте, где скорость деформации орбиты максимальна. Азимутальный размер смещающей обмотки определяется из условия обеспечения минимума реактивной энергии, требуемой для смещения орбиты на нужную величину ΔR .

4. Увеличение магнитного поля на одной половине орбиты и уменьшение поля на другой половине. Физическая сторона процесса аналогична предыдущему способу. В этом случае относительное изменение поля на орбите (на одной стороне – положительное, на другой – отрицательное), необходимое для смещения орбиты на ΔR , можно приближенно оценить по формуле:

$$\frac{\Delta B_0}{B_0} \approx \frac{\pi n}{4} \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (4.5)$$

В большинстве практических случаев более выгодным в отношении обеспечения минимума реактивной энергии является способ азимутального нарушения магнитного поля на равновесной орбите. На практике могут быть использованы и комбинации рассмотренных выше способов смещения.

Импульс тока в обмотке смещения генерируется с помощью схемы, показанной на рис. 4.4.

От однополупериодного выпрямителя В1, аналогичного используемому в схеме инжекции, конденсатор С заряжается до амплитудного значения положительной полуволны напряжения зарядного трансформато-

ра. Разрядиться он не может, т. к. на сетку тиратрона ТГИ подано отрицательное смещение от выпрямителя В2. В нужный момент времени на сетку тиратрона подается положительный импульс, тиратрон открывается и конденсатор С разряжается через витки смещающей обмотки. Синхронизация импульса запуска с магнитным полем ускорителя осуществляется с помощью пермаллового пикера, импульс от которого задерживается на время $t_{зад} = \varphi_{см} / \omega_{магн}$, соответствующее фазе смещения $\varphi_{см}$, где $\omega_{магн}$ – частота силового питания электромагнита ускорителя.

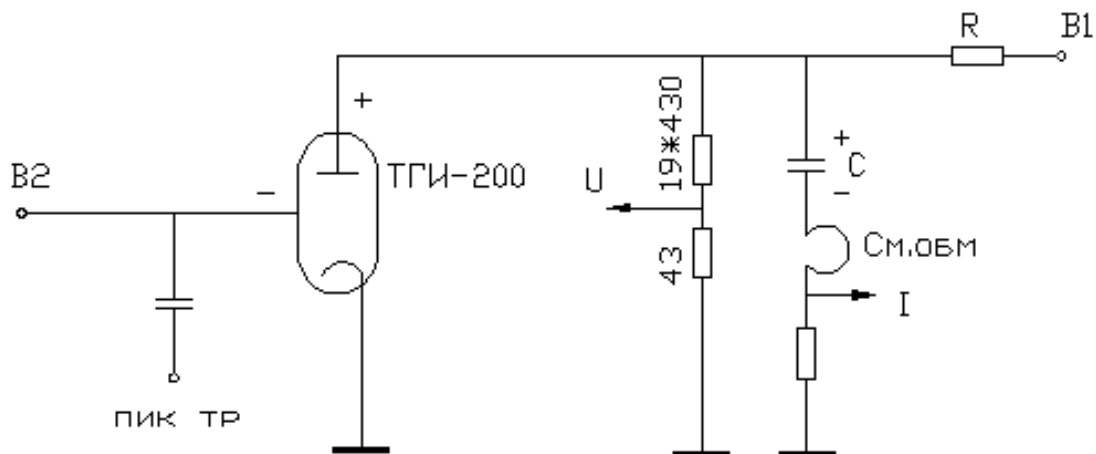


Рис. 4.4. Схема смещения электронов с орбиты

Емкость конденсатора С и индуктивность обмотки смещения L образуют резонансный контур с собственной частотой:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.6)$$

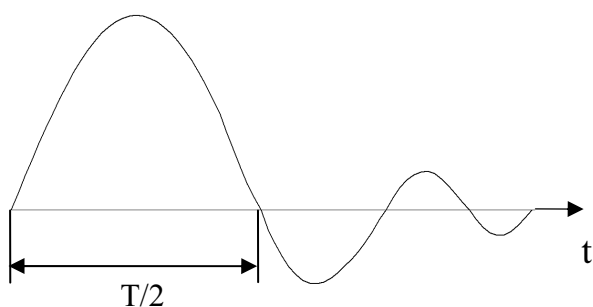


Рис. 4.5. Осциллограмма импульса тока в обмотке смещения

Длительность импульса в обмотке смещения τ равна половине периода колебательного разряда емкости С (рис. 4.5).

$$\tau = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega} = \pi\sqrt{LC}. \quad (4.7)$$

Вследствие сравнительно высокой добротности корпуса, в отличие от схемы инжекции, конденсатор С к концу импульса тока в обмотке перезаряжается до отрицательного напряжения. Это отрицательное напряжение на емкости после импульса составляет по величине в среднем около (60 ÷ 80)% от первоначального положительного напряжения, до которого конденсатор был заряжен.

Взаимное фазирование токов и напряжений в зарядной и разрядной цепях показано на рис. 4.6. Заряд емкости C от выпрямителя $B1$ начинается в тот момент, когда напряжение на аноде зарядного вентиля превышает на величину потенциала зажигания U_3 напряжение на катоде, которое в этот момент равно U_c . Таким образом, заряд емкости C начинается уже при отрицательном напряжении на аноде зарядного вентиля.

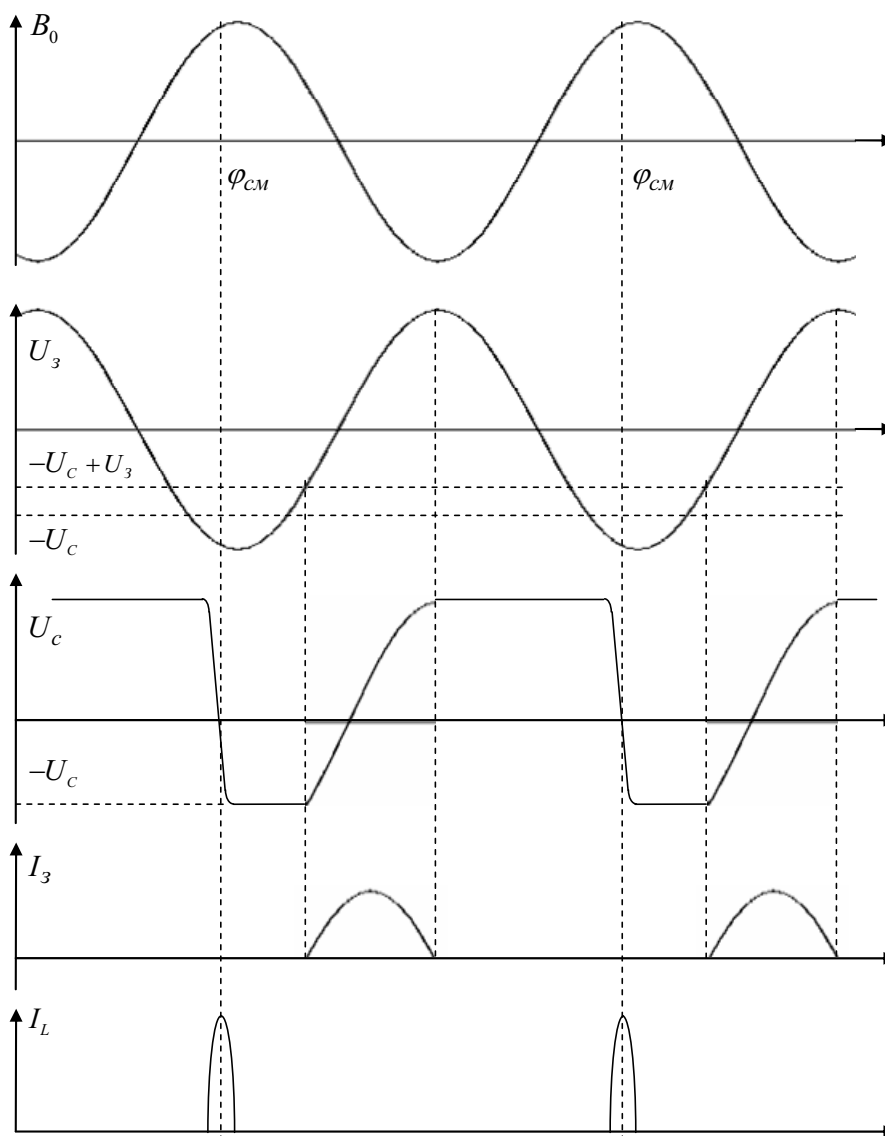


Рис. 4.6. Этюры токов и напряжений в схеме смещения:
 B_0 – индукция магнитного поля на орбите; U_3 – напряжение зарядного трансформатора; U_c – напряжение на емкости C ; I_3 – ток заряда емкости C от выпрямителя $B1$; I_L – импульс тока в обмотке смещения

Тип коммутирующего прибора в разрядной цепи схемы смещения можно выбрать из следующих соображений. На основании закона сохранения энергии, если не учитывать активные потери в разрядном контуре, можно записать:

$$\frac{CU_c^2}{2} = A_M, \quad (4.8)$$

$$\frac{CU_c^2}{2} = \frac{LI^2}{2}. \quad (4.9)$$

Здесь A_M – энергия магнитного поля, создаваемого обмоткой смещения, I – амплитуда импульса тока в обмотке смещения. Подстановка в уравнение (4.9) индуктивности L через частоту разрядного контура ω по формуле (4.6) дает:

$$I = \omega CU. \quad (4.10)$$

Исключая из уравнений (4.8) и (4.10) емкость C , получаем:

$$U_c I = 2\omega A_M. \quad (4.11)$$

Полученное выражение позволяет весьма просто обосновать выбор коммутирующего прибора в разрядном контуре, исходя непосредственно из параметров импульсного магнитного поля. Для выбранного способа смещения и при известной топографии импульсного поля A_M находится интегрированием плотности энергии магнитного поля по занимаемому им объему. Если для коммутирующего прибора известны допустимое напряжение на аноде U_a , допустимая амплитуда тока I_{\max} и допустимая длительность импульса $\tau_{\text{дон}}$, то выбор следует производить из условий:

$$U_c < U_a, \quad I < I_{\max}, \quad \tau < \tau_{\text{дон}}.$$

Расчет ампервитков смещающей обмотки производится обычными методами. Конструкция обмотки смещения и число витков в ней обычно задаются размерами места для ее размещения. В практических случаях для бетатрона на энергию порядка 15 МэВ амплитуда импульсов тока достигает величины порядка сотен ампер, длительность – порядка десятков микросекунд.

Если определены величины I и L , то емкость и напряжение на ней ориентировочно, без учета активных потерь в разрядном контуре, могут быть определены из соотношения (4.9). При этом условие $\tau = \pi\sqrt{LC} \leq \tau_{\text{дон}}$ накладывает ограничение на выбор величины емкости:

$$C \leq \frac{\tau_{\text{дон}}^2}{\pi^2 L}. \quad (4.12)$$

4.3. Лабораторная работа № 4

Цель работы

- Ознакомление с устройством и работой схемы инжекции и снятие ее основных характеристик;
- ознакомление с устройством и работой схемы смещения и определение ее основных параметров.

Задание 1

1. Зарисовать полную принципиальную схему инжекции, указать тип приборов и номиналы отдельных ее элементов.
2. Запустить схему. Для этого:
 - а) включить накал газоразрядных ламп и дать им прогреться в течение $5 \div 6$ минут;
 - б) включить анодное напряжение схемы и установить на автотрансформаторе $20 \div 30$ вольт;
 - в) регулируя потенциометром подачу отрицательного смещения на сетку тиратрона, добиться его импульсной работы (прерывистое голубое свечение). При появлении розового свечения немедленно снизить анодное напряжение или увеличить отрицательное смещение на сетке.
3. Ознакомиться с включением импульсного вольтметра и измерить напряжение на импульсном трансформаторе.
4. С помощью осциллографа снять зависимость напряжения инжекции от напряжения на первичной обмотке зарядного трансформатора (трансформатор Тр.3. на рис. 4.2).
5. Присоединить к импульсному трансформатору эквивалентную нагрузку (рис. 4.7) и повторить пункт 4. Зарисовать форму импульса инжекции.

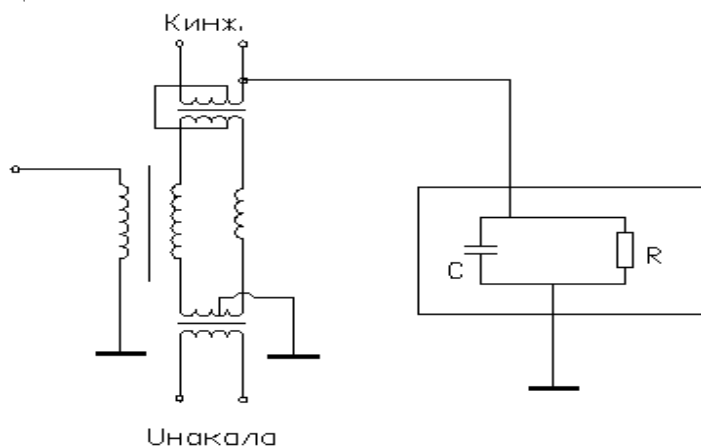


Рис. 4.7. Схема присоединения эквивалентной нагрузки к импульсному трансформатору

Задание 2

1. Ознакомиться с используемой в работе схемой смещения, зарисовать полную схему с указанием номиналов сопротивлений, емкостей и параметров используемых газоразрядных ламп.
2. Включить схему в следующей последовательности:
 - а) Включить накал газоразрядных ламп и дать им прогреться в течение $5 \div 6$ минут.

- б) Включить анодное напряжение схемы. Регулируя потенциометром величину отрицательного смещения на сетке тиратрона, добиться его импульсной работы (прерывистое голубое свечение). При появлении розового свечения необходимо или выключить анодное напряжение или увеличить отрицательное смещение на сетке.
3. Присоединяя поочередно осциллограф к шунту для измерения тока в обмотке смещения и к делителю напряжения, снять зависимости амплитуд импульсов с шунта $U_{ш}$ и делителя U_{∂} в зависимости от напряжения на первичной обмотке зарядного трансформатора U_1 .
4. По данным измерений подсчитать напряжения на конденсаторе U и амплитуды тока в смещающей обмотке I . Данные измерений и вычислений занести в таблицу:

№	U_1	$U_{ш}$	U_{∂}	I, A	U, B	L	L_{cp}
1							
2							
⋮							
⋮							

5. Для каждого значения U_1 по формуле (4.9) вычислить индуктивность смещающей обмотки L и найти среднее значение.
6. С помощью осциллографа измерить длительность импульса тока в смещающей обмотке и по формуле (4.7) найти ее индуктивность. Сравнить с результатами расчета L по формуле (4.9).

4.4. Контрольные вопросы

1. Чем обуславливается выбор напряжения на инжекторе?
2. Для чего необходимо в схеме инжекции использовать формирующую линию?
3. С какой целью вторичная обмотка импульсного трансформатора наматывается двойным проводом?
4. Какие существуют способы смещения электронов с равновесной орбиты?
5. Как подается низковольтное напряжение накала катодов ламповых диодов в высоковольтных зарядных цепях схем инжекции и смещения?

4.5. Список литературы

1. Разин В.М. Расчет элементов схемы инжекции электронов в бетатроне // Известия ТПИ. – Томск: Изд. ТПИ, 1957. – Т. 87. – 164 с.
2. Разин В.М. Расчет элементов схемы смещения электронов в бетатроне // Известия ТПИ. – Томск: Изд. ТПИ, 1957. – Т. 87. – 178 с.

5. ФАЗОВАЯ И СТАТИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСКОРИТЕЛЯХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОЛЕМ

В ускорителях с переменным магнитным полем (бетатрон, синхротрон) конструкция обратного магнитопровода (ярма) влияет на степень неоднородности магнитного поля в межполюсном зазоре. С точки зрения технологии изготовления и сборки магнитопровода для бетатрона, например, наиболее простой является прямоугольная форма сечения ярма. Но в Ш-образном магнитопроводе такая форма вызывает настолько большую азимутальную неоднородность поля в окрестностях равновесной орбиты, что нормальная работа установки становится невозможной. Необходимо применять специальные методы выравнивания неоднородности поля, например, используя многоступенчатое или шихтованное ярмо. Но и в этом случае после изготовления электромагнита требуется дальнейшая корректировка поля.

5.1. Фазовая и статическая неоднородности магнитного поля

Существует два вида неоднородностей – статическая и фазовая (временная) неоднородности. Статическая неоднородность обусловлена неравенством амплитуд индукций магнитного поля в разных точках орбиты. Это обусловлено неодинаковым сопротивлением отдельных тру-

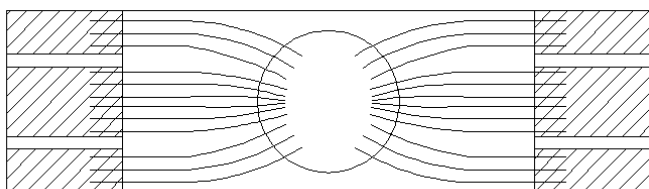


Рис. 5.1. Несимметрия магнитного поля в Ш-образном магнитопроводе

бок магнитного поля в основном за счёт несимметрии конструкции (рис. 5.1), неточности изготовления и сборки всего электромагнита в целом, неравномерности зазоров, краевых эффектов при переходе магнитного поля через конструктивные

зазоры. Временная или фазовая неоднородность обусловлена сдвигом фаз магнитного поля в различных точках орбиты. Она возникает за счёт различной активной составляющей тока в отдельных замкнутых трубках магнитного поля. Это различие в активном токе вызывается неравномерным распределением потока по пакетам ярма, переходом магнитного потока из пакета в пакет поперёк листов стали. На рис. 5.2 показана временная зависимость магнитных потоков в разных точках орбиты (условно обозначены 1, 2, 3). В результате для фиксированного момента времени значение поля на равновесной орбите будет зависеть от азимута (рис. 5.3, кривая I).

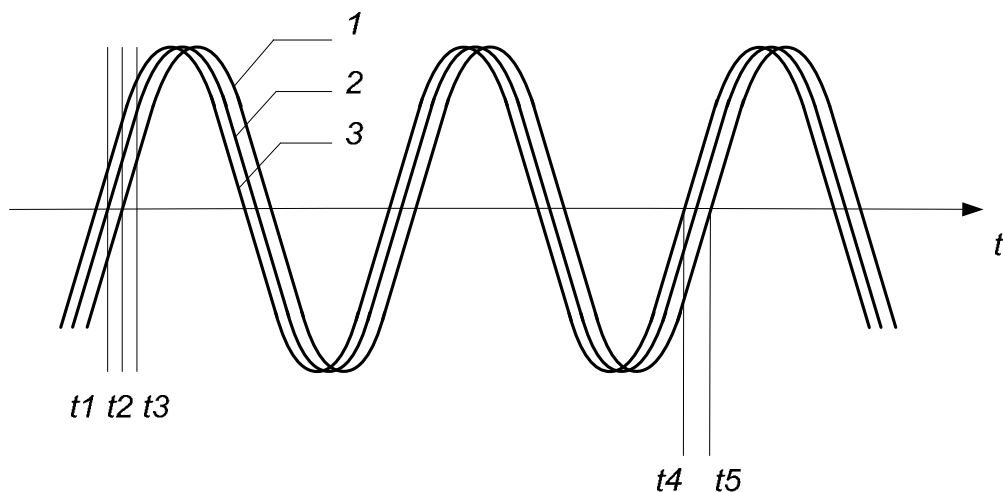


Рис. 5.2. Сдвиг во времени магнитных потоков в разных точках орбиты

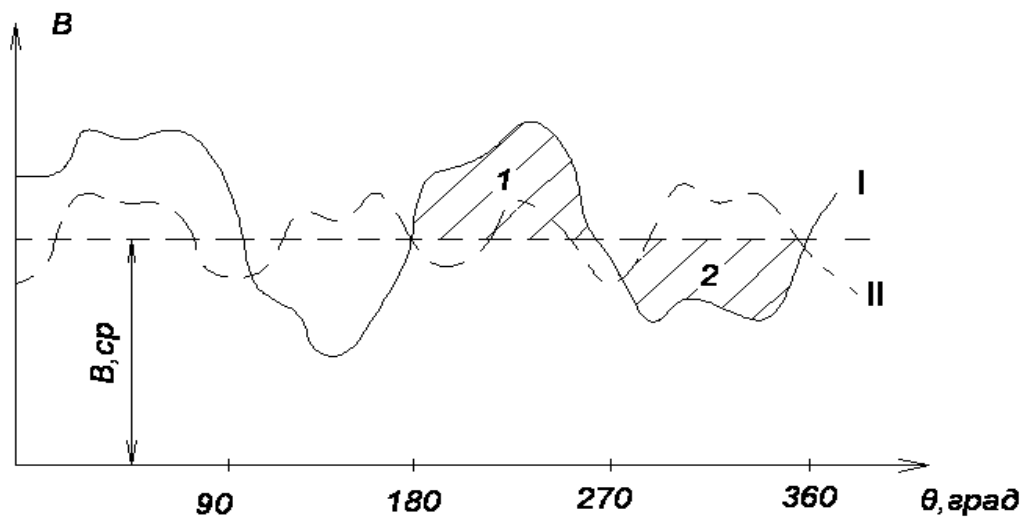


Рис.5.3 Азимутальное распределение магнитного поля на равновесной орбите:
I – до исправления фазовой неоднородности; II – после исправления

От статической и фазовой неоднородности зависит и характер распределения магнитного поля по радиусу. Пусть магнитное поле во всех точках изменяется синфазно, т. е. имеет место только статическая неоднородность. За счёт последней показатель спада поля n не является величиной постоянной по радиусу. Выберем на фиксированном азимуте две близкие точки с радиусами R_1 и R_2 . Если $R_2 - R_1 \rightarrow 0$, то в пределах данного участка можно считать $n = \text{const}$. При измерении магнитного поля с помощью катушки наводимая в ней ЭДС пропорциональна амплитуде поля. В этом случае

$$B_{m_1} = B_0 \frac{R_0^{n_m}}{R_1^{n_m}}, \quad (5.1)$$

$$B_{m_2} = B_0 \frac{R_0^{n_m}}{R_2^{n_m}}, \quad (5.2)$$

где B_{m_1} и B_{m_2} – амплитуды магнитной индукции на радиусах R_1 и R_2 соответственно, а n_m – показатель спада в точке при амплитудном значении поля. Отсюда следует

$$\frac{B_{m_1}}{B_{m_2}} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{n_m}. \quad (5.3)$$

Если известна зависимость $B_m = f(R)$ в виде экспериментальной кривой, то при синфазном изменении поля n_m можно найти из соотношения

$$n_m = \frac{\lg \left(\frac{B_{m_1}}{B_{m_2}} \right)}{\lg \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \quad (5.4)$$

и по точкам построить график $n_m = f(R)$. Мгновенные значения n_t в любой произвольный момент времени t будут равны значениям n_m , подсчитанным для амплитудных значений поля. Для мгновенных значений можно записать:

$$n_t = \frac{\lg \left(\frac{B_{m_1} \sin \varphi}{B_{m_2} \sin \varphi} \right)}{\lg \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} = n_m. \quad (5.5)$$

При наличии статической неоднородности магнитного поля зависимость $n = f(R)$ для каждого азимута будет в общем случае различна, но в течение времени нарастания поля величина n в любой точке поля остаётся постоянной, и зависимость $n = f(R)$ для любого азимута будет неизменной.

Иначе обстоит дело при наличии фазовой неоднородности. Фазовая неоднородность поля в любой точке межполюсного пространства может быть измерена относительно поля в основной (опорной) точке как разность Δt времени прохождения поля через нулевое значение в данной

точке и опорной (рис. 5.2). Тогда если φ – фаза поля в опорной точке в некоторый фиксированный момент времени, то в этот момент фаза в рассматриваемой точке будет сдвинута на величину $\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\pi f\Delta t$ и поле в этой точке будет равно $B = B_m \sin(\varphi + \Delta\varphi)$.

Мгновенное значение показателя спада при наличии фазовой неоднородности:

$$n_t = \frac{\lg\left(\frac{B_{m_1} \sin(\varphi + \Delta\varphi_1)}{B_{m_2} \sin(\varphi + \Delta\varphi_2)}\right)}{\lg\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (5.6)$$

где $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ – фазовые сдвиги магнитного поля в точках с радиусами R_1 и R_2 . Отсюда следует, что при наличии фазовой неоднородности магнитного поля величина n с течением времени непрерывно меняется. Для обычных напряжений на электронной пушке (30÷60 кВ) при $f = 50$ Гц для ускорителей на энергию от единицы до сотен МэВ фаза инжекции изменяется в пределах от десятков до единиц микросекунд, что соответствует единицам эл. градусов. Сдвиг по фазе $\Delta\varphi$ обычно ещё меньше фазы инжекции $\varphi_i = \omega t_i$. При малых $\Delta\varphi$ $\cos \Delta\varphi \approx 1$, $\sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi$. Поэтому

$$\sin(\varphi + \Delta\varphi) = \sin \varphi \cos \Delta\varphi + \cos \varphi \sin \Delta\varphi \approx \sin \varphi + \cos \varphi \Delta\varphi. \quad (5.7)$$

Влияние фазовой неоднородности максимально в начальный период ускорения, т. е. в момент инжекции, когда $\sin(\varphi_i + \Delta\varphi) \approx \varphi_i + \Delta\varphi$, а φ_i и $\Delta\varphi$ близки. Здесь максимальны как искажения распределения поля по радиусу (радиально-фазовая неоднородность), так и относительные флуктуации в азимутальном распределении поля (азимутально-фазовая неоднородность). По мере увеличения фазы искажения мгновенного распределения поля в зазоре электромагнита за счёт фазовой неоднородности уменьшаются практически полностью исчезают при $\varphi = 90^\circ$.

На рис. 5.4–5.9 приведены примеры использования уравнений (5.5) и (5.6) для анализа магнитного поля конкретного бетатрона на энергию 5 МэВ с Ш–образным шихтованным ярмом, возбуждаемого током промышленной частоты. В этом бетатроне $R_0 = 9,5$ см, $n = 2/3$, диаметр полюсов 25 см, диаметр галет 9 см.

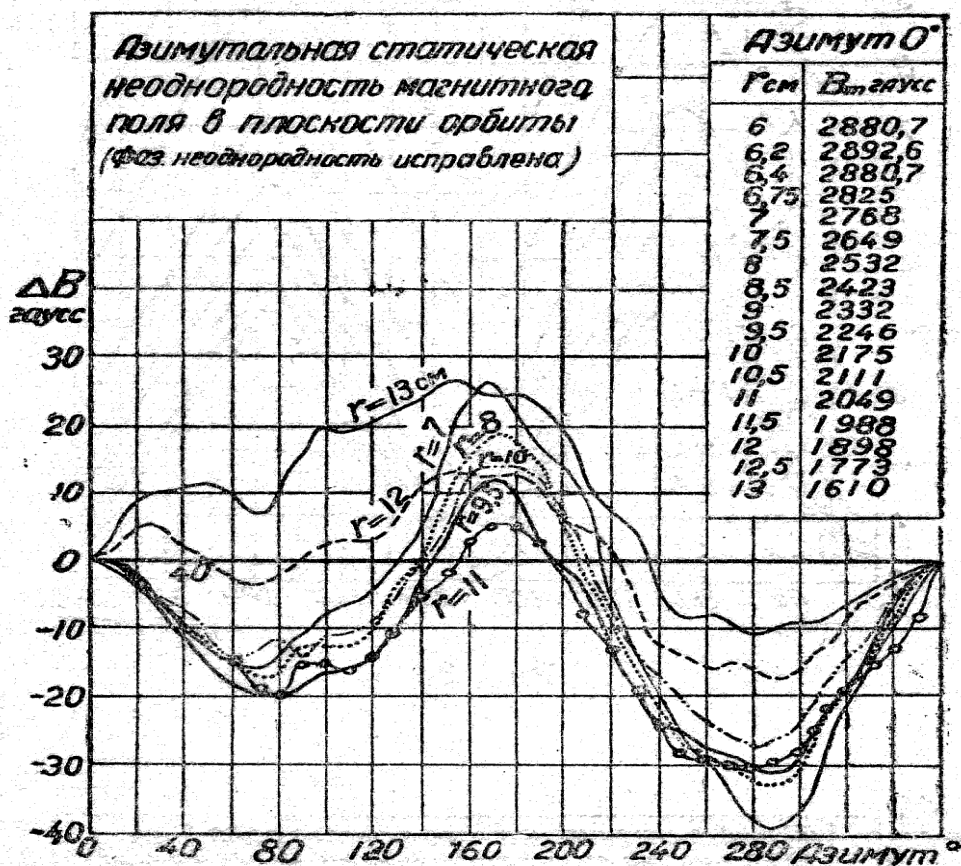


Рис. 5.4. Азимутальная статическая неоднородность магнитного поля в плоскости орбиты

На рис. 5.4 приведена азимутальная статическая неоднородность магнитного поля в плоскости орбиты относительно поля на азимуте 0° и соответствующем радиусе. Амплитудные значения поля на азимуте 0° представлены в таблице на том же рисунке. Для определения амплитуды магнитного поля в какой-либо точке достаточно к амплитуде поля на азимуте 0° и том же радиусе алгебраически прибавить величину статической неоднородности, найденную по графику для этой точки.

На рис. 5.5 приведены результаты измерения естественной фазовой неоднородности магнитного поля в плоскости орбиты, а на рис. 5.6 представлена фазовая структура магнитного поля того же бетатрона после исправления азимутальной фазовой неоднородности при помощи системы короткозамкнутых витков. Для вычисления мгновенных распределений показателя спада по радиусу для какого-либо азимута по формуле (5.6) необходимо построить график $\Delta\varphi = f(R)$ для этого азимута. На рис. 5.7 такой график построен по данным рис. 5.5 для азимутов 0° и 90° .

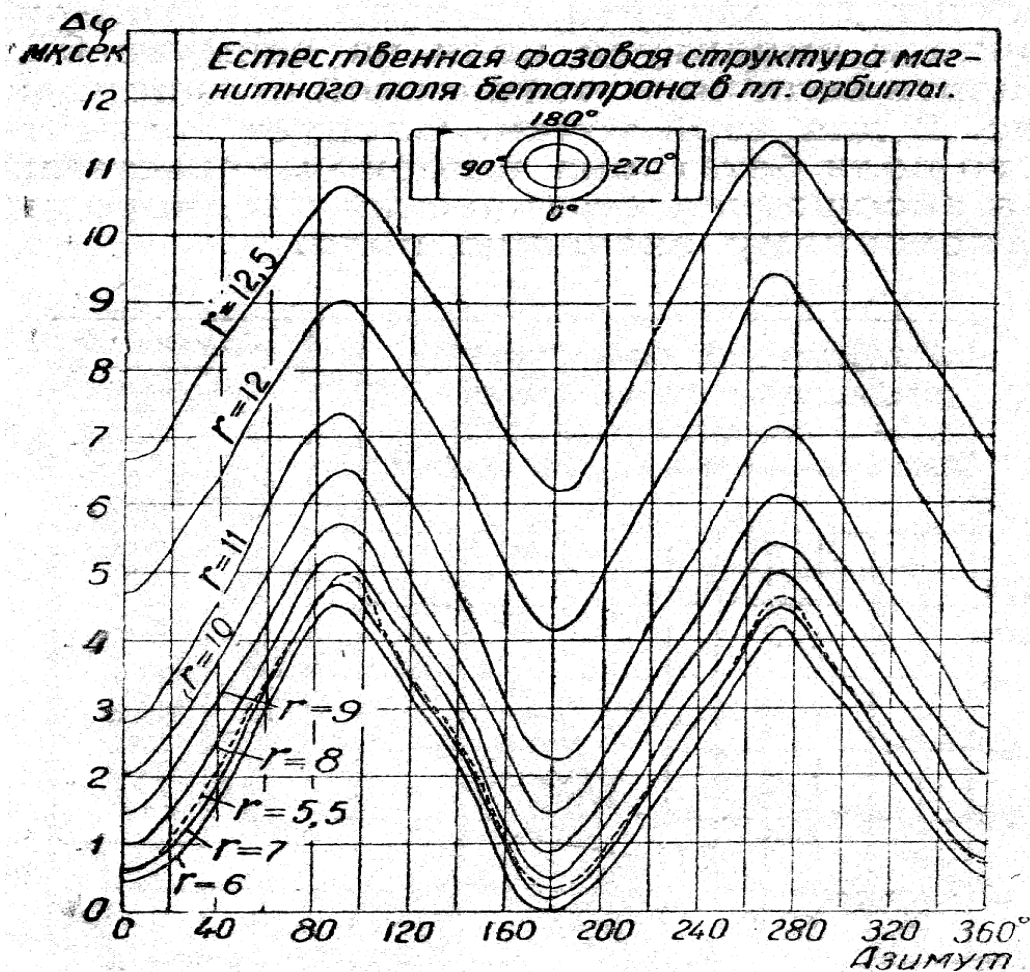


Рис. 5.5. Естественная фазовая неоднородность магнитного поля в плоскости орбиты

На рис. 5.8 и 5.9 приведены мгновенные значения показателя спада для различных моментов времени t , подсчитанные по формуле (5.6) для азимутов 0° и 90° с использованием данных рис. 5.7. Кривые для $t = 1/200$ сек. построены при амплитудном значении магнитного поля ($\varphi = 90^\circ$), когда фазовая неоднородность становится мало ощутимой. Негладкость (волнистость) этих кривых, как и остальных, объясняется наличием радиальной статической неоднородности. Результаты, представленные на этих рисунках, получены для магнитного поля до исправления фазовой неоднородности. Видно, что при малых фазах, т. е. вблизи фазы инжекции, деформации структуры магнитного поля чрезвычайно велики. Область устойчивого движения, где $0 < n < 1$, сильно сужается, относительные флуктуации напряжённости магнитного поля вдоль орбиты недопустимо велики. Поэтому исправление фазовой неоднородности является обязательным. Оно заключается в уменьшении амплитуды флуктуаций магнитного поля вдоль орбиты относительно

среднего значения и увеличении числа переходов кривой через линию среднего поля (кривая II на рис. 5.3).

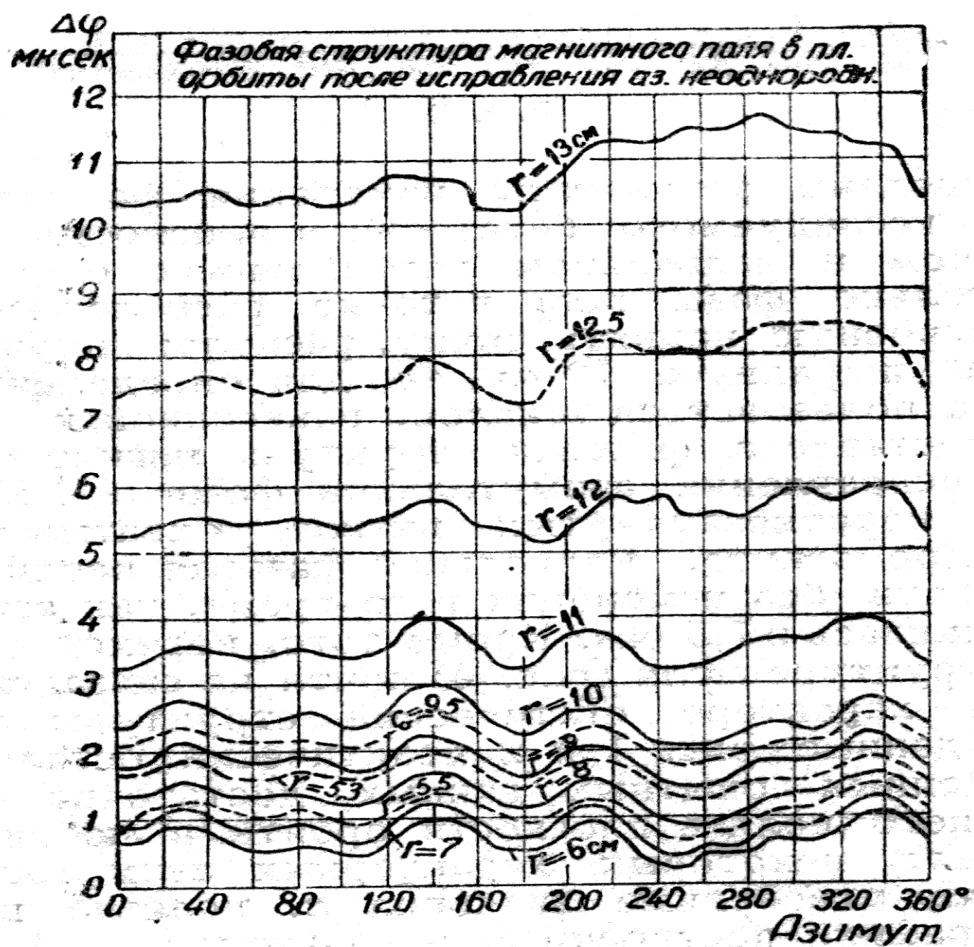


Рис. 5.6. Фазовая структура магнитного поля после исправления фазовой неоднородности

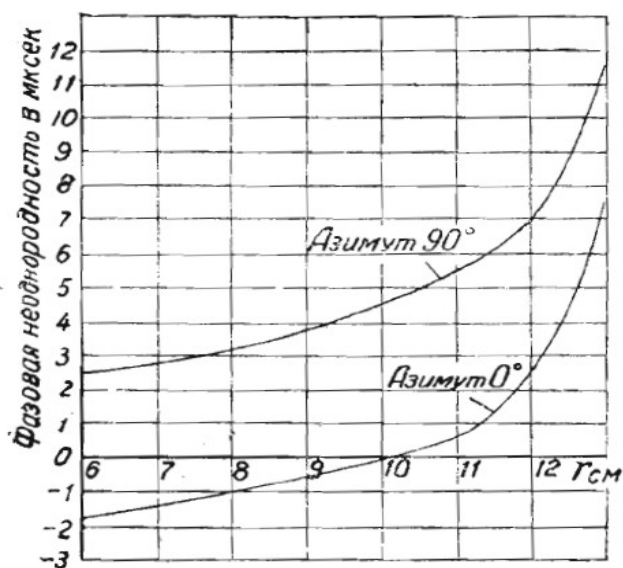


Рис. 5.7. Зависимость фазового сдвига магнитного поля от радиуса

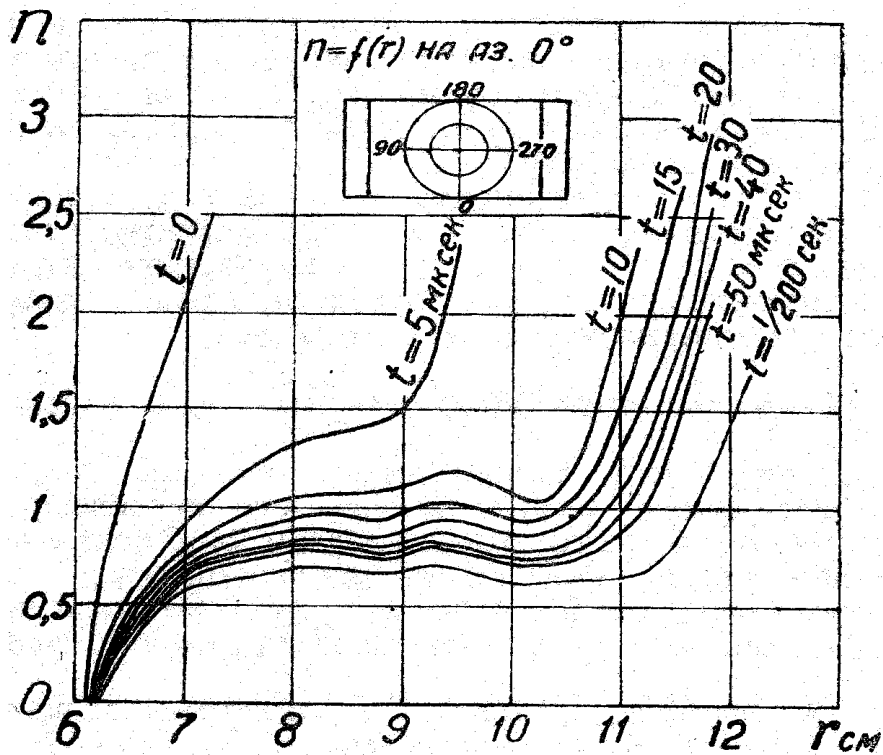


Рис. 5.8. Мгновенные распределения по радиусу показателя спада поля на азимуте 0°

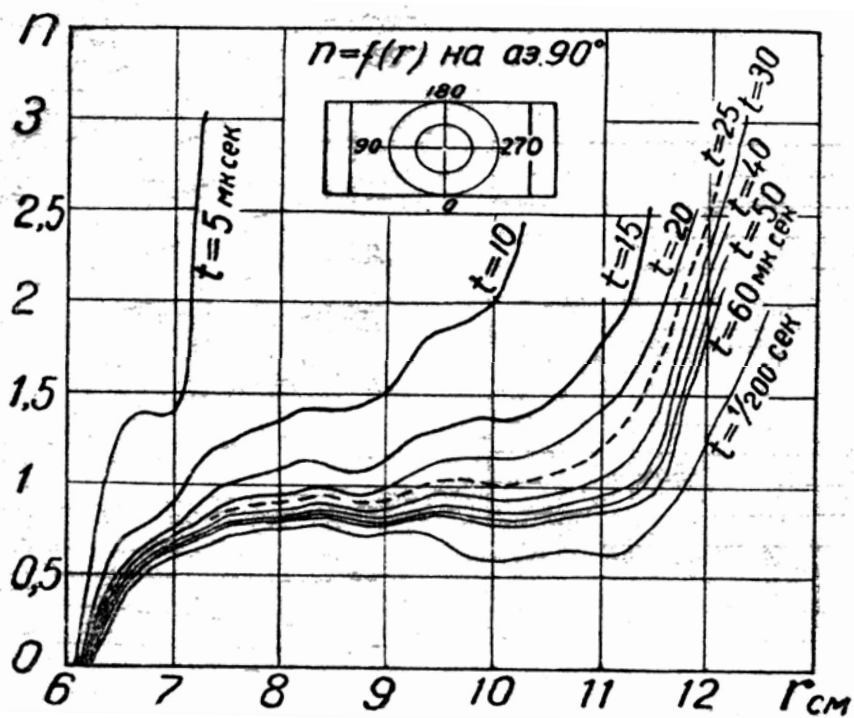


Рис. 5.9. Мгновенные распределения по радиусу показателя спада поля на азимуте 90°

5.2. Измерение фазовой неоднородности магнитного поля

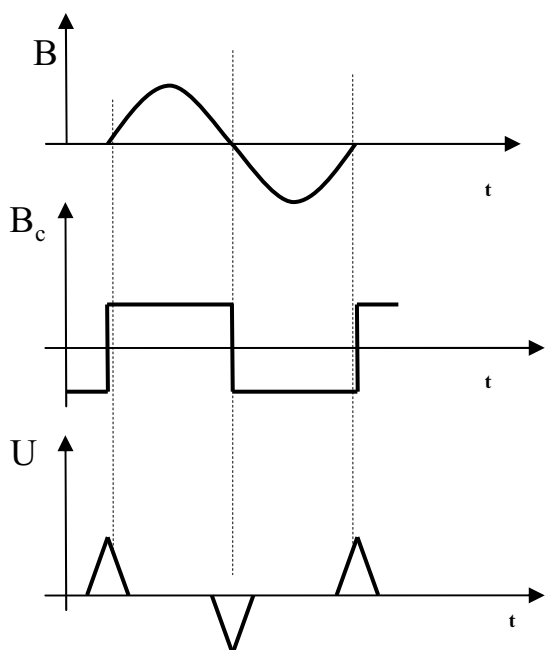


Рис. 5.10. Фиксация момента прохождения поля через нулевые значения с помощью пикера

Для измерения сдвига фаз между магнитными потоками фиксируется момент, когда магнитный поток проходит через нулевое значение. Это осуществляется с помощью пикеров – миниатюрных катушек с сердечником из сплава пермаллой. Пермаллой – это металл с большой магнитной проницаемостью, который насыщается при малых напряженностях магнитного поля. На рис. 5.10 показано, как изменяется индукция B_c в сердечнике пикера, если его поместить в переменное магнитное поле B . В момент перемагничивания сердечника, т. е. в момент, когда магнитное поле имеет нулевое значение, в обмотке пикера генерируется короткий импульс

напряжения. Помещая два пикера в две разные точки и измеряя с помощью осциллографа расстояние между импульсами, можно определить сдвиг фаз между магнитными потоками в этих точках (рис. 5.11). Но такой метод неточен. Применяется дифференциальное встречное включение двух катушек, когда на осциллографе наблюдается результат наложения двух импульсов разной полярности. Схема их включения показана на рис. 5.12. Неподвижная катушка НК прикрепляется к полюсу в опорной точке, относительно которой определяется сдвиг фаз в исследуемых точках. Подвижная катушка ПК находится на расчётном радиусе R_0 и может перемещаться по азимуту от 0° до 360° . По обмотке неподвижной катушки пропускается постоянный ток (ток подпитки), величина которого регулируется потенциометром R . Ток подпитки создаёт в сердечнике пикера дополнительное поле B_n (рис. 5.13). В зависимости от направления этого поля относительно основного фазы, при которой результирующее поле имеет нулевое значение, перемещается в область больших или меньших значений. В области малых фаз вблизи точки $\varphi=0$ закон изменения поля $B(t)$ близок к линейному. Поэтому при малых сдвигах фазы (в реальных случаях не более нескольких градусов) $\Delta\varphi \sim B_n$, т. е. сдвиг фазы пропорционален току подпитки.

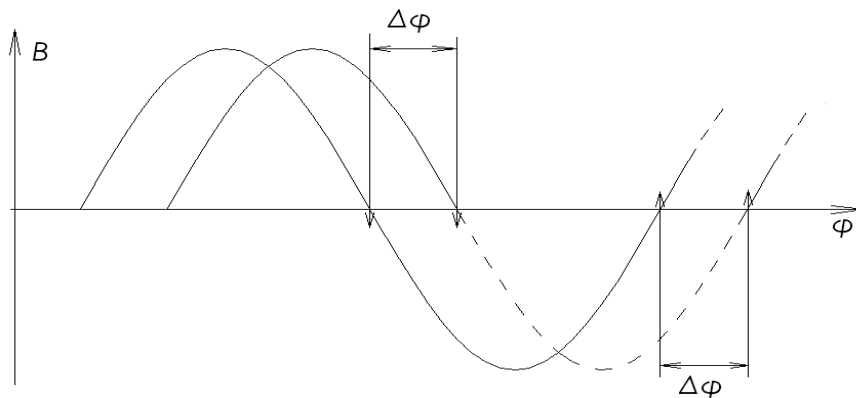
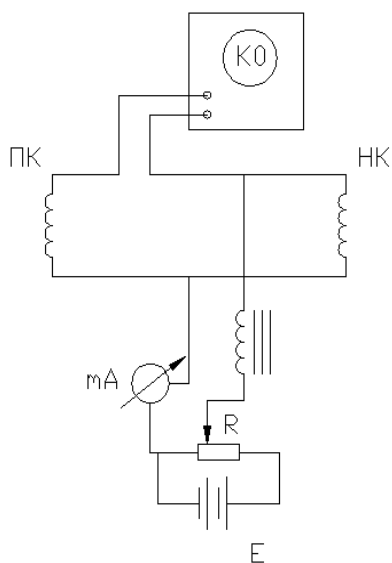


Рис. 5.11. Фазовый сдвиг магнитных потоков



Принцип измерения фазовой неоднородности иллюстрирует рис. 5.14. Пусть линия 2 описывает поле в месте установки неподвижной катушки, а линия 1 – в исследуемой точке. Тогда А – пик напряжения неподвижной катушки, В – пик напряжения подвижной катушки, находящейся на каком-либо азимуте. Фазы магнитных потоков в точках расположения катушек сдвинуты на величину $\Delta\phi$.

Рис. 5.12. Схема встречного включения 2-х пикеров

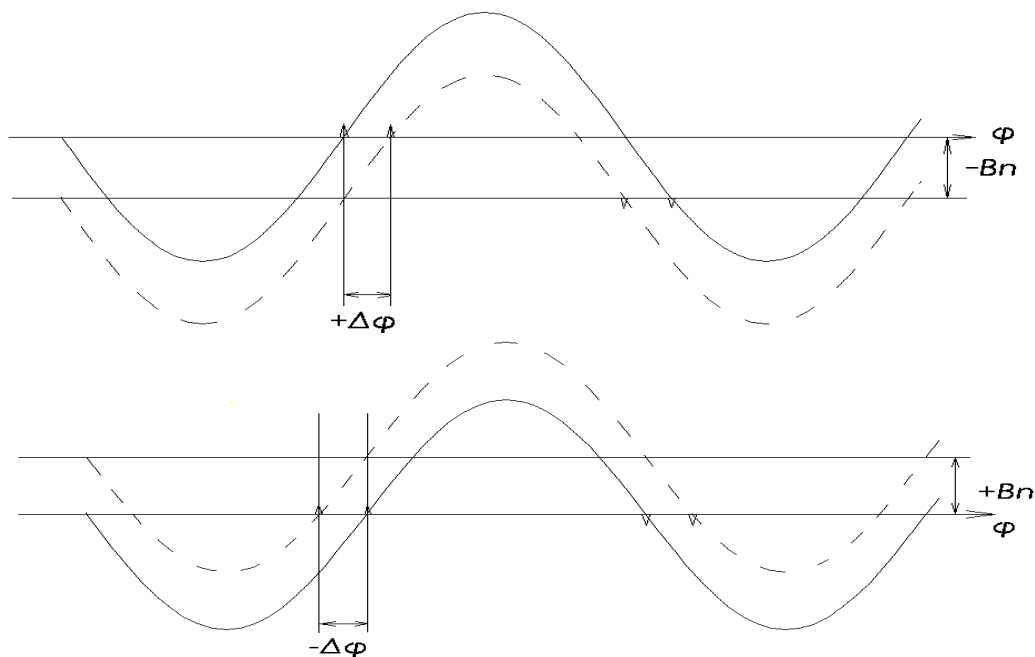


Рис. 5.13. Смещение фазы импульса пикера наложением постоянного поля B_n

Для определения этого сдвига нужно пропустить по обмотке неподвижной катушки постоянный ток I_n такой величины, чтобы пик

A переместился по фазе до положения A', т. е. на величину $\Delta\varphi$. Необходимый для этого ток подпитки пропорционален $\Delta\varphi$.

Когда пики A и B сдвинуты по фазе относительно друг друга, то на экране осциллографа результат их сложения выглядит в виде двухгорбового импульса с разной высотой горбов (рис. 5.15). При точном совпадении фаз пиков A' и B высота горбов импульса на экране осциллографа одинакова. В зависимости от амплитуд и длительности импульсов с катушек форма наблюдаемого импульса на экране может быть разной (рис. 5.16). Но в любом случае это будет импульс с двумя равными по высоте горбами. Устанавливая подвижную катушку на разные азимуты θ , снимают зависимость $I_n = f(\theta)$ и, зная соотношение между I_n и $\Delta\varphi$, определяют сдвиг фаз на различных азимутах $\Delta\varphi = f(\theta)$.

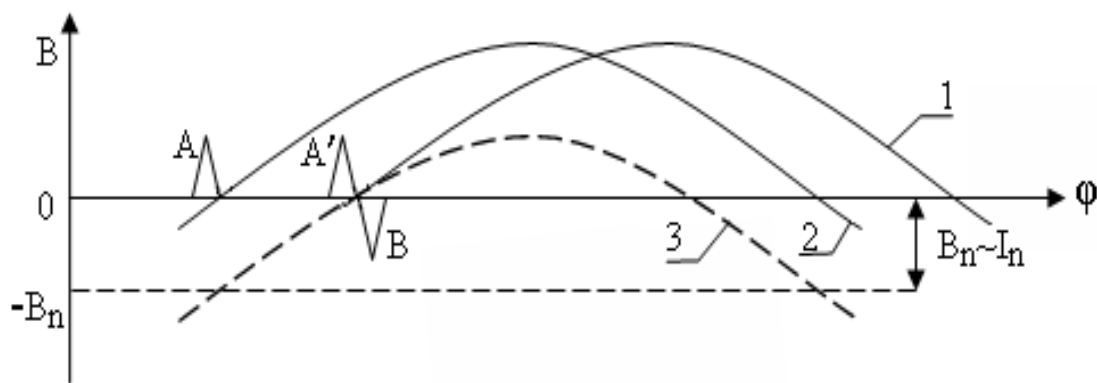


Рис. 5.14. Совмещение сдвинутых по фазе импульсов неподвижного и подвижного пикеров

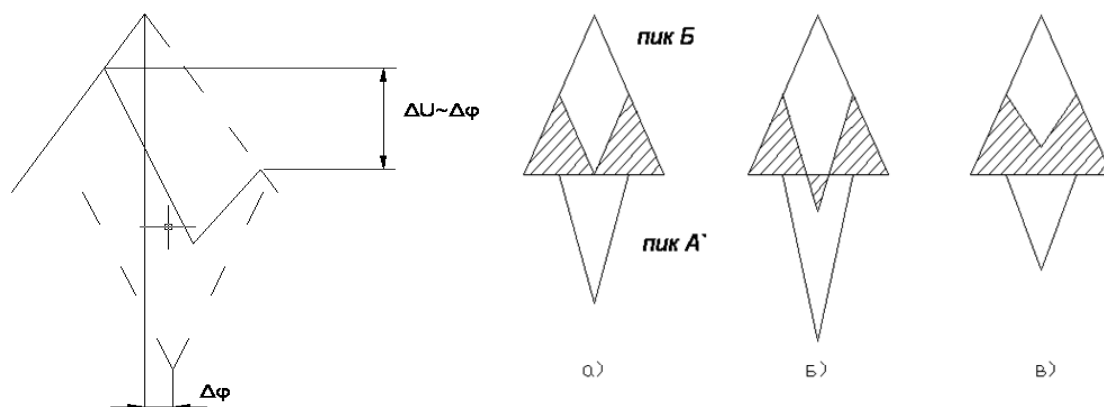


Рис. 5.15. Результат сложения сдвинутых по фазе импульсов

Рис. 5.16. Результат сложения совмещённых по фазе импульсов

5.3. Исправление фазовой неоднородности

Исправление фазовой неоднородности достигается выравниванием сдвигов фаз магнитных потоков в различных частях магнитопровода. Существует следующие методы исправления фазовой структуры.

1. С помощью короткозамкнутых витков.
2. Метод восьмёрок.
3. Подпитка отдельных пакетов ярма постоянным током.
4. Исправление фазовой неоднородности с помощью фольги.

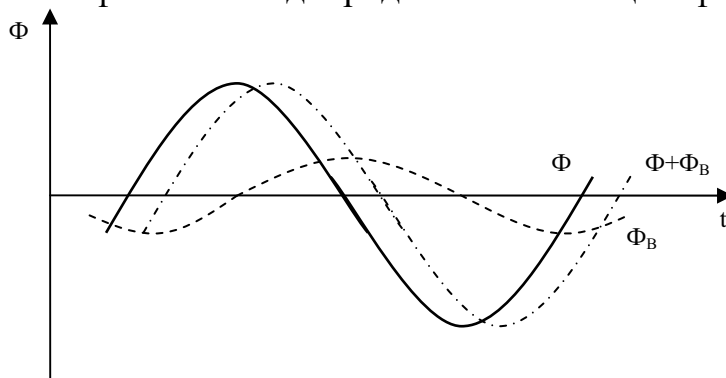


Рис. 5.17. Сдвиг по фазе магнитного потока с помощью короткозамкнутого витка

Если какой-либо пакет ярма магнитопровода охватывает короткозамкнутый виток, то под действием переменного магнитного потока $\Phi(t)$ в этом пакете в витке индуцируется вихревая ЭДС и, соответственно, ток, пропорциональные $\frac{d\Phi(t)}{dt}$. Следовательно, магнитное поле, создаваемое этим током, сдвинуто по фазе на 90° относительно возбуждающего его потока $\Phi(t)$ (рис. 5.17). В результате магнитный поток в этом пакете, равный сумме возбуждающего потока Φ и возбужденного витком потока Φ_B , оказывается сдвинутым в сторону больших фаз. Магнитное поле станет запаздывающим по фазе на том участке орбиты, где оно в значительной степени формируется магнитным потоком пакета ярма с витком.

В методе восьмёрок компенсация отставания фазы в одних пакетах производится за счёт опережающей фазы в других пакетах путём встречного включения витков, которые на них находятся. Если в предыдущем случае поменять направление тока в короткозамкнутом витке и, следовательно, направление возбуждаемого им магнитного поля, то результирующий магнитный поток будет сдвинут по фазе в противоположном направлении, т. е. в сторону меньших фаз. Для этого виток нужно включить встречно виткам с большим значением ЭДС на пакете, где поток опережает среднее значение. Например, если на рис. 5.18 ЭДС

витков на правом пакете больше суммы ЭДС витков на левом и среднем пакетах, то в правом пакете сдвиг будет в сторону больших фаз, а в остальных – в сторону меньших фаз.

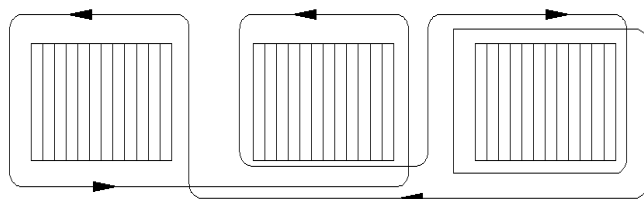


Рис. 5.18. Выравнивание фаз магнитных потоков в пакетах ярма методом восьмёрок

На рис. 5.3 в области I поле опережает среднее, а в области II отстает. Виткам на пакетах, магнитный поток в которых формирует поле в области I, необходимо встречно включить витки на пакетах, формирующих поле в области II, причём ЭДС первых должен быть больше. В этом случае уменьшится опережение в области I и отставание в области II.

Смещение фазы при подпитке витков на пакетах ярма постоянным током иллюстрирует рис. 5.13. В зависимости от направления тока можно смещать фазы в сторону как больших, так и меньших значений.

Эффект от размещения проводящей фольги на определённых участках межполюсного зазора эквивалентен использованию короткозамкнутого витка.

Эффект от размещения проводящей фольги на определённых участках межполюсного зазора эквивалентен использованию короткозамкнутого витка.

5.4. Измерение статической неоднородности

В ускорителях с Ш-образным (двухстоечным) магнитопроводом статическая неоднородность магнитного поля на орбите достигает примерно 1 % от величины поля. Таким образом, если измерять статическую неоднородность одной измерительной катушкой, то очень сложно заметить изменение показаний прибора, измеряющего ЭДС, наводимую в катушке, перемещаемой вдоль равновесной орбиты. Поэтому для измерений статической неоднородности применяется дифференциальный метод. В медианной плоскости межполюсного пространства установлен измерительный диск.

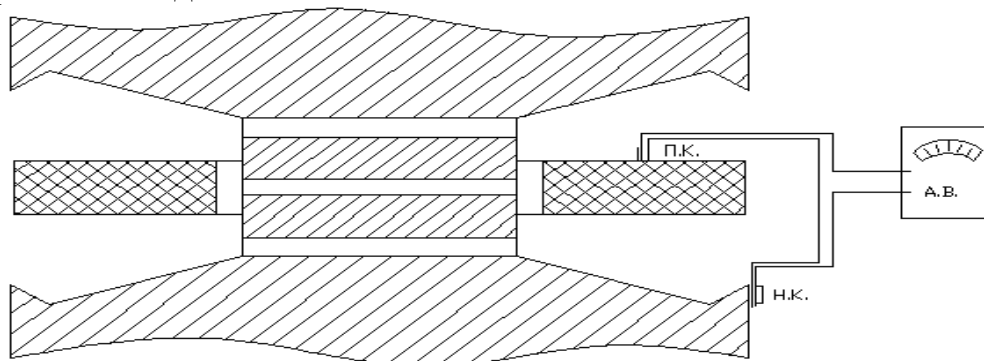


Рис. 5.19. Схема измерения статической неоднородности. НК – неподвижная катушка, ПК – подвижная катушка, АВ – вольтметр

На радиусе равновесной орбиты на нём крепится измерительная катушка, которая вместе с диском может поворачиваться на угол от 0° до 360° . Другая катушка укрепляется неподвижно на полюсе (рис. 5.19). Число витков этой катушки и её месторасположение должны быть выбраны так, чтобы наводимая в ней ЭДС была несколько меньше, чем в подвижной катушке. Эти две катушки включаются встречно и разность наводимых в них ЭДС измеряется вольтметром. Теперь для измерения небольшого разностного сигнала можно использовать более чувствительную шкалу вольтметра.

5.5. Лабораторная работа № 5

Цель работы

- Измерение фазовой неоднородности магнитного поля бетатрона;
- исправление фазовой неоднородности методом восьмёрок и короткозамкнутых витков;
- измерение статической неоднородности магнитного поля.

Задание 1. Измерение и исправление фазовой неоднородности

1. Укрепить катушки с пермалловыми сердечниками – неподвижную на полюсе, подвижную – на измерительном диске на радиусе 9,5 см на азимуте $\theta = 0$.
2. Подать напряжение на первичную обмотку электромагнита. Регулируя ток подпитки I_n одной из катушек, добиться совмещения импульсов с катушек. Убедиться, что катушки включены встречно. В противном случае неподвижную катушку повернуть на 180° .
3. Поворачивая диск от 0° до 360° через 10° измерить естественную азимутальную фазовую неоднородность. Построить зависимость $I_n = f(\theta)$.
4. Используя короткозамкнутые витки на пакетах ярма определить, на каких участках орбиты поле отстаёт по фазе, а на каких опережает среднее значение.
5. Составить схему исправления фазовой неоднородности с помощью восьмёрок.
6. Измерить исправленную фазовую неоднородность. Исправленную и естественную неоднородность представить на одном графике.
7. Измерить радиальную фазовую неоднородность, перемещая подвижную катушку по радиусу на азимуте 0° . Построить график.
8. Продемонстрировать исправление фазовой неоднородности с помощью фольги.
9. Объяснить ход полученных зависимостей.

Задание 2. Измерение статической неоднородности

1. Установить подвижную измерительную катушку на измерительном диске на радиусе равновесной орбиты $R_0 = 9,5$ см.
2. Включить электромагнит и измерить напряжение на катушке.
3. Подобрать место крепления неподвижной катушки таким образом, чтобы напряжение на ней было немного меньше, чем на подвижной катушке. Закрепить неподвижную катушку.
4. Соединить выводы катушек так, чтобы они были включены встречно.
5. Выбрать нужный диапазон измерения вольтметра и измерить разность напряжений катушек ΔU в зависимости от азимута от 0° до 360° с шагом 10° .
6. Построить график $\Delta U = f(\theta)$.
7. Построить график $\Delta U = f(\theta)$ в полярных координатах, как показано на рис. 5.20.
8. Объяснить ход полученной зависимости.

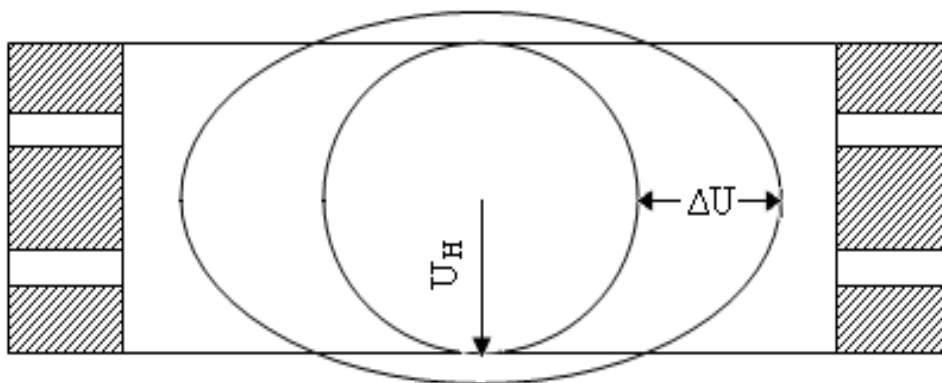


Рис. 5.20. Азимутальная статическая неоднородность в полярных координатах

5.6. Контрольные вопросы

1. Объяснить причину возникновения статической и фазовой неоднородности магнитного поля в ускорителях с переменным электромагнитом.
2. Почему по мере нарастания магнитного поля меняется показатель спада поля по радиусу?
3. Почему нельзя использовать в бетатроне небольшие напряжения инжекции?
4. Объяснить механизм выравнивания фазовой структуры магнитного поля с помощью короткозамкнутых витков и восьмёрок.

5.7. Список литературы

1. Гришин К. С. К вопросу выбора рационального места расположения инжектора и определение величины напряжения инъекции для бетатрона // Известия ТПИ. – Томск: Изд. ТПИ, 1957. – Т. 87. – 137 с.
2. Степанов Ю. М. Руководство по расчёту шихтованного ярма переменного электромагнита ускорителя: учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006.
3. Степанов Ю.М. Расчёт электромагнита индукционного ускорителя электронов – бетатрона: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2006.

6. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ МЕЖПОЛЮСНОГО ЗАЗОРА УСКОРИТЕЛЯ С МЯГКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Требуемый закон распределения магнитного поля в межполюсном пространстве ускорителя обеспечивается правильным выбором профиля полюсных наконечников.

В ускорителях с мягкой фокусировкой магнитное поле должно спадать по радиусу по закону $B = Const/R^n$, где n – показатель спада поля, который в этих ускорителях должен лежать в интервале $0 < n < 1$. Если n не зависит от радиуса, то константу удобно задать через поле B_0 на радиусе расчетной орбиты R_0 – $Const = B_0 R_0^n$. Тогда закон распределения магнитного поля по радиусу в медианной плоскости ускорителя:

$$B(R) = B_0 \cdot \frac{R_0^n}{R^n}. \quad (6.1)$$

Это соотношение и обуславливает профиль полюсных наконечников.

6.1. Расчет профиля полюсов

Сопротивление магнитной цепи бетатрона определяется в основном сопротивлением воздушного зазора. Поверхности полюсных наконечников можно считать эквипотенциальными поверхностями магнитного поля, из которых силовые линии поля выходят перпендикулярно поверхности (рис. 6.1). В этом случае справедливо равенство:

$$F = 0,8B_0\lambda_0 = 0,8B\lambda, \quad (6.2)$$

где: F – магнитная напряженность зазора – намагничивающие ампервитки, необходимые для преодоления магнитного сопротивления межполюсного пространства; λ_0 и λ – длина (в см) магнитной силовой линии в воздушном зазоре соответственно на радиусе равновесной орбиты

R_0 и произвольном радиусе R ; B_0 и B – соответственно значения индукции магнитного поля на радиусах R_0 и R (единица измерения – Гс).

С учетом соотношения (6.1) из формулы (6.2) получаем:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{R^n}{R_0^n} \quad (6.3)$$

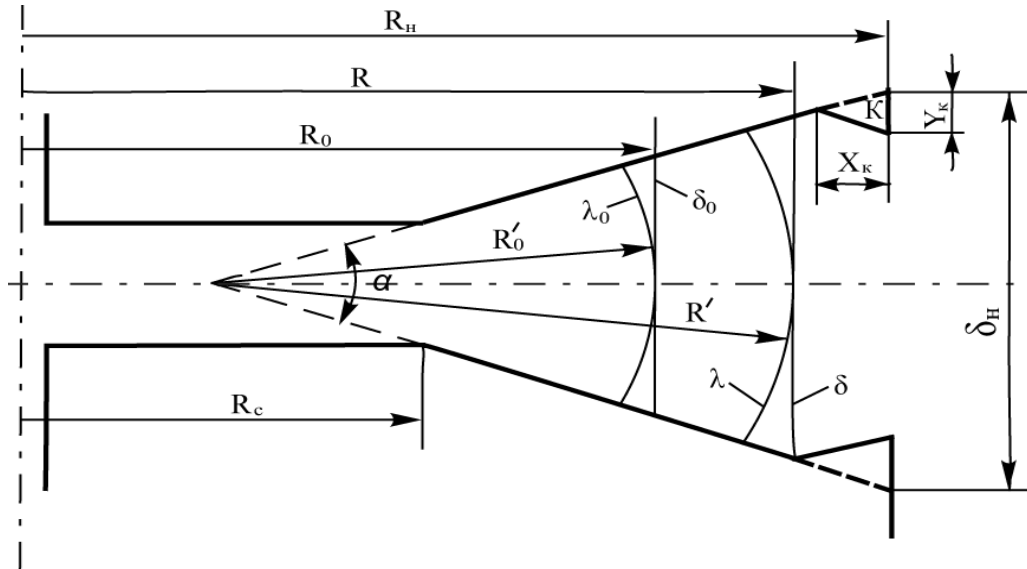


Рис. 6.1. К расчёту профиля полюсных наконечников

Из рис. 6.1 следует:

$$\delta = 2R'tg \frac{\alpha}{2}, \quad (6.4)$$

$$\lambda = 2R' \frac{\alpha}{2}, \quad (6.5)$$

где R' – радиус кривизны магнитной силовой линии. Отсюда на радиусе R отношение длины силовой линии λ к высоте межполюсного зазора δ :

$$\frac{\lambda}{\delta} = \frac{\alpha/2}{tg(\alpha/2)}. \quad (6.6)$$

Практически угол $\alpha/2$ не превышает 10° . Поэтому в средней части межполюсного зазора, где не сказывается «краевой эффект», длина силовой линии λ мало отличается от длины воздушного зазора δ на том же радиусе – различие не превышает $\sim 1\%$. В технических расчетах можно принимать $\lambda \cong \delta$, и формулу (6.3) переписать в виде:

$$\delta = \delta_0 \frac{R^n}{R_0^n}. \quad (6.7)$$

Тангенс угла наклона $\alpha/2$ профиля полюсов относительно медианной плоскости на любом радиусе R :

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \frac{d\delta}{dR} = \frac{\delta n}{2R}, \quad (6.8)$$

так как из формулы (6.7) следует:

$$\frac{d\delta}{dR} = \delta_0 n \frac{R^{n-1}}{R_0^n} = \delta \frac{n}{R}. \quad (6.9)$$

Рассчитанная по формуле (6.7) линия профиля полюсов является криволинейной. Но при $\frac{R_0}{R_c} \leq 1,5$ она мало отличается от прямой (линия

pq на рис. 6.2). Поэтому на практике полюса для упрощения технологии изготовления выполняются с прямым профилем полюсных наконечников. Наклон линии профиля $\alpha_0/2$ выбирается так, чтобы показатель спада магнитного поля n совпадал с расчетным значением n_0 на радиусе равновесной орбиты R_0 :

$$\frac{\alpha_0}{2} = \operatorname{arctg} \frac{\delta_0 n_0}{2R_0}. \quad (6.10)$$

Показатель спада на других радиусах можно найти, подставив в формулу (6.8) значение угла наклона профиля для радиуса R_0 (формула 6.10):

$$n(R) = \frac{2R}{\delta(R)} \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}. \quad (6.11)$$

Из рис. 6.2 следует, что наклон профиля полюсов $\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}$ и межполюсный зазор $\delta = f(R)$ на уже готовой машине можно вычислять по формулам:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} = \frac{\delta_n - \delta_e}{2(R_n - R_c)}, \quad (6.12)$$

$$\delta(R) = \delta_e + (R - R_c) \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}. \quad (6.13)$$

Подставим в формулу (6.4) выражение (6.8) для $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$:

$$\delta = 2R' \frac{\delta n}{2R}. \quad (6.14)$$

Отсюда следует:

$$n = \frac{R}{R'}. \quad (6.15)$$

Это соотношение важно с точки зрения сборки и настройки ускорителя – показатель спада n уже готового электромагнита можно регулировать путем изменения зазора между полюсами, т.к. в этом случае при неизменном R изменяется R' .

Отсюда же следует, что для полюсов с прямым профилем показатель спада зависит от радиуса. При уменьшении радиуса R' уменьшается медленнее, т. е. n уменьшается. При увеличении R показатель спада увеличивается.

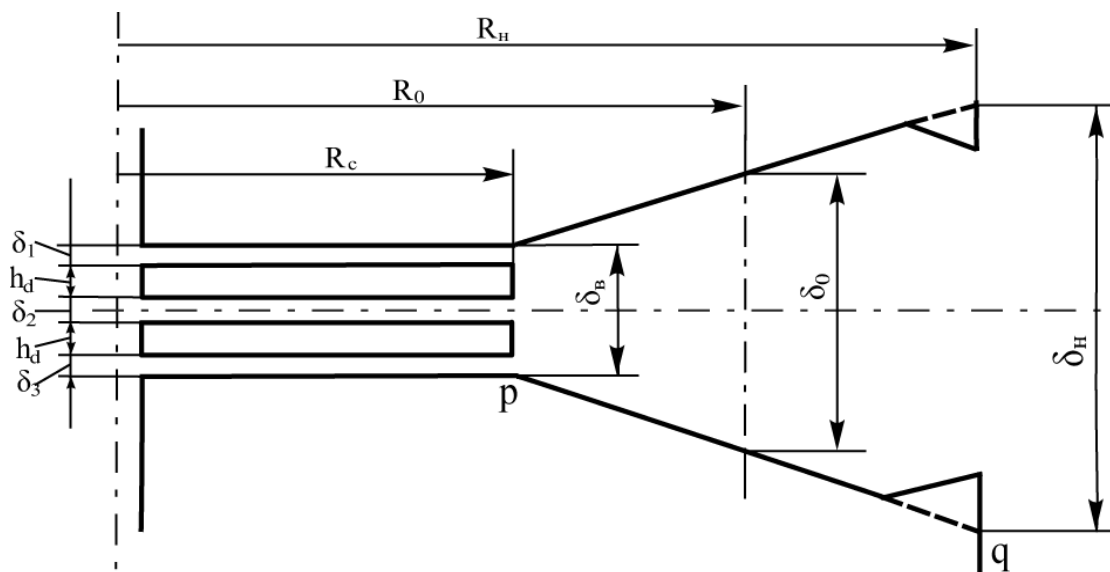


Рис. 6.2. Профиль полюсов при наличии галет

При расчете межполюсного зазора по формуле (6.7) не учитывается краевой эффект. При приближении к краю полюсных наконечников кривизна магнитных силовых линий увеличивается. Их длина заметно отличается от величины воздушного зазора из-за выталкивания крайних линий из зазора. Для уменьшения влияния краевого эффекта полюсные наконечники снабжаются корректирующими козырьками K (рис. 6.1). Размеры козырьков подбираются экспериментально. Этот же краевой эффект у края зазора в сердечнике искажает магнитное поле вблизи внутренней стенки ускорительной камеры. Этого можно в значительной степени избежать, если заменить сердечник цилиндрическими вставками (галетами), разбив тем самым зазор в сердечнике на несколько меньших зазоров (рис. 6.2). Полагая, как и ранее, поверхности полюсных наконечников эквипотенциальными поверхностями магнитного поля и пренебрегая магнитным сопротивлением стали галет, полный воздушный зазор в сердечнике $\delta_c = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ находится из соотношения:

$$0,8 \cdot B_0 \delta_0 = 0,8 \cdot B_c \delta_c, \quad (6.16)$$

где B_c – индукция в зазоре сердечника.

6.2. Моделирование магнитного поля в межполюсном зазоре

Окончательное уточнение необходимого профиля полюсов ускорителя осуществляется подгонкой профиля на моделях, позволяющих по результатам магнитных измерений проводить корректировку профиля.

Наиболее просто это сделать с помощью так называемой «плоской» модели межполюсного зазора, изображенной на рис. 6.3. Магнитопровод установки набран из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм. Магнитное поле возбуждается намагничивающей катушкой 1, запитанной от промышленной сети с частотой 50 Гц. Блоки магнитопровода А и В образуют два плоских полюса. Нужная форма межполюсного зазора выставляется по трафарету 2.

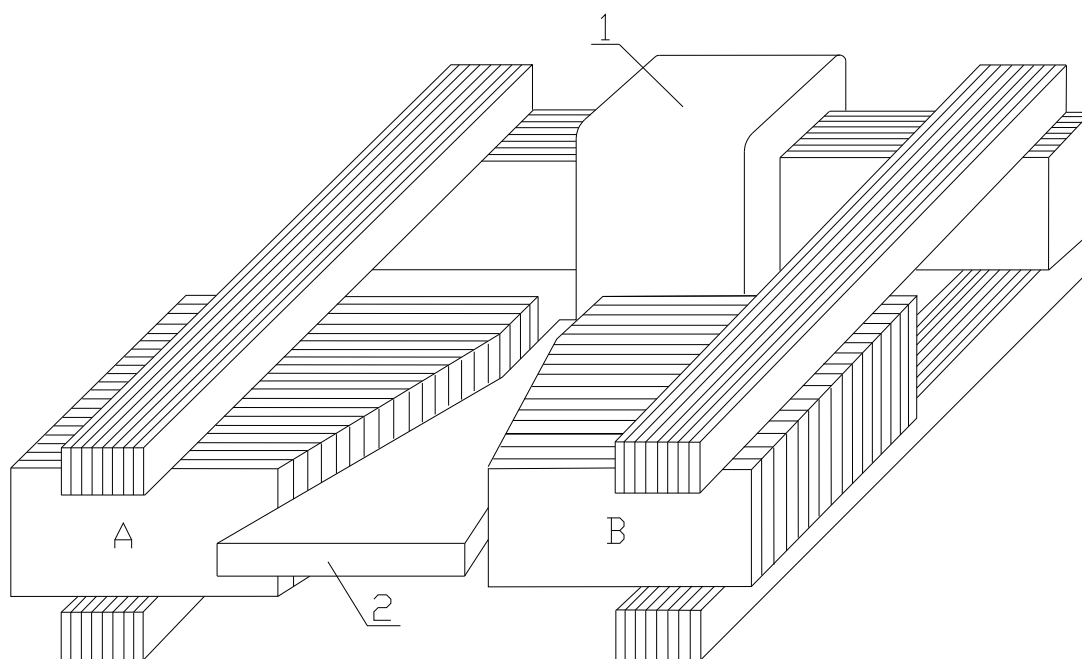


Рис. 6.3. Магнитопровод электромагнита «плоской» модели (крепежные детали не показаны):

1 – намагничивающая катушка, 2 – трафарет межполюсного зазора

Для измерения магнитного поля используется измерительная катушка с большим числом витков. Наводимое в катушке напряжение измеряется вольтметром. Поскольку наводимое напряжение пропорционально амплитуде магнитной индукции в месте расположения катушки, справедливо равенство:

$$n = -\frac{\partial B}{\partial R} \cdot \frac{R}{B} = -\frac{\partial U}{\partial R} \cdot \frac{R}{U}. \quad (6.17)$$

Если зависимость $U(R)$ снята по точкам, то показатель спада можно подсчитать по формуле:

$$n(R_{cp}) = -\frac{\Delta U}{\Delta R} \cdot \frac{R_{cp}}{U_{cp}}, \quad (6.18)$$

где $\Delta U = U_{i+1} - U_i$; $\Delta R = R_{i+1} - R_i$; $R_{cp} = \frac{R_i + R_{i+1}}{2}$; $U_{cp} = \frac{U_i + U_{i+1}}{2}$.

6.3. Лабораторная работа № 6

Цель работы

- Ознакомление с методом моделирования профиля полюсов электромагнита с помощью плоской модели;
 - измерение распределения магнитного поля в моделируемом зазоре;
 - исправления профиля полюсов.
1. Ослабить болты крепления блоков А и В, образующих полюса электромагнита (рис. 6.3).
 2. С помощью трафарета выставить необходимый профиль межполюсного зазора. При этом необходимо следить за тем, чтобы осевая линия выставляемого зазора совпадала с линией, по которой перемещается по направляющим измерительная катушка.
 3. Удалить трафарет и зафиксировать блоки А и В, затянуть ослабленные болты.
 4. Измерить напряжение на катушке $U(R)$ в зависимости от радиальной координаты. Для этого необходимо шкалу линейки с измерительной катушкой привязать к координатам межполюсного зазора. Геометрические размеры зазоров приведены в табл. 1. Трафарет № 1 воспроизводит межполюсный зазор бетатрона на энергию 16 МэВ при $R_0/R_c = 1,4$, трафарет № 2 – бетатрона на 11 МэВ при $R_0/R_c = 1,6$. Оба бетатрона имеют прямолинейный профиль полюсов, наклон которого вычислен по формуле (6.10) при $n_0 = 2/3$.

Таблица 1

Геометрические размеры межполюсных зазоров в сантиметрах

Трафарет	R_n	R_0	R_c	δ_n	δ_0	δ_s	δ_c
№ 1	19,56	15,21	10,86	7,27	6,146	4,91	2,14
№ 2	18,37	13,37	8,35	8,6	7,0	5,10	2

5. Результаты измерений занести в таблицу 2 и вычислить зависимость $n = f(R_{cp})$ по формуле (6.18). Построить график.

Для повышения точности расчёта зависимости $n = f(R_{cp})$ можно воспользоваться компьютерной программой, в которой вычисление n производится по сглаженной экспериментальной зависимости $U(R)$. Порядок работы с программой приведён на страницах 105÷106.

Таблица 2

Измеренное распределение показателя спада по радиусу

$R, см$	R_1	R_2	R_3				
U	U_1	U_2	U_3				
R_{cp}	$\frac{R_1 + R_2}{2}$	$\frac{R_2 + R_3}{2}$					
ΔR	$R_2 - R_1$	$R_3 - R_2$					
U_{cp}	$\frac{U_1 + U_2}{2}$	$\frac{U_2 + U_3}{2}$					
$-\Delta U_{cp}$	$U_1 - U_2$	$U_2 - U_3$					
$n(R_{cp})$							

6. Для исследуемого профиля по формулам (6.12) и (6.13) подсчитать $tg \frac{\alpha_0}{2}$ и зависимость $\delta(R)$. Данные занести в таблицу 3 и по формуле (6.11) найти ожидаемое исходя из формы профиля полюсов распределение $n = f(R)$.
7. Измеренное $n = f(R_{cp})$ и рассчитанное $n = f(R)$ распределения построить на одном графике, проанализировать и объяснить ход зависимостей.
8. Составить план корректировки профиля полюсов и повторив пункт 4, измерить исправленное распределение по радиусу показателя спада магнитного поля.

6.4. Контрольные вопросы

1. Когда можно реальный профиль полюсов заменить прямой линией?
2. Как можно откорректировать значение показателя спада на расчетном радиусе на уже изготовленном электромагните?
3. Почему центральный сердечник изготавливается в виде набора дисков (галет)?
4. Как влияет высота блоков А и В, образующих полюса плоской модели, на точность измерения распределения $n = f(R)$?

Таблица 3

Расчетное распределение показателя спада по радиусу

R					
$R - R_c$					
$\delta(R)$					
$2R \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}$					
$n(R)$					

6.5. Список литературы

1. Филиппов М.Ф. К расчету профиля полюсных наконечников электромагнита бетатрона // Известия ТПИ. – Томск: Изд. ТПИ, 1957. – Т. 87. – 87 с.
2. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 350 с.
3. Степанов Ю.М. Расчет электромагнита индукционного ускорителя электронов – бетатрона: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 78 с.

7. РАДИУС РАВНОВЕСНОЙ ОРБИТЫ В БЕТАТРОНЕ

В бетатроне ускоряемые электроны движутся по замкнутой круговой орбите в нарастающем во времени магнитном поле. Изменяющееся во времени магнитное поле индуцирует вихревое электрическое поле, силовые линии которого представляют собой замкнутые окружности, охватывающие переменный магнитный поток. Электроны движутся вдоль этих силовых линий и под действием электрической силы, совпадающей с направлением движения электронов, их энергия непрерывно увеличивается.

Радиус орбиты электронов R в магнитном поле B :

$$R = \frac{\sqrt{W^2 + 2WE_0}}{eB} \quad (7.1)$$

где W и E_0 – соответственно, кинетическая энергия и энергия покоя электрона, а e – заряд электрона. Поле на орбите радиуса R называют управляющим (ведущим) полем, так как оно формирует орбиту. Вихревое электрическое поле создаётся изменяющимся во времени магнитным потоком, заключённым внутри орбиты. Это магнитное поле называют ускоряющим. Чтобы радиус орбиты оставался постоянным увеличение энергии частиц должно синхронно следовать за увеличением магнитного поля на орбите. Для этого необходимо обеспечить такое соотношение между скоростями изменения ведущего и ускоряющего полей, чтобы в любой момент времени ускорения выполнялось соотношение

$$B(t) \sim \sqrt{W(t)^2 + 2W(t)E_0}$$

7.1. Бетатронное соотношение

Пусть электроны движутся по равновесной орбите постоянного радиуса $R_0(t) = Const$. Магнитный поток внутри этой орбиты

$$\Phi = \pi R_0^2 \cdot \bar{B}, \quad (7.2)$$

где \bar{B} – среднее значение индукции магнитного поля внутри круга с радиусом R_0 . ЭДС вихревого электрического поля U и напряжённость вихревого поля \mathcal{E} вдоль окружности радиуса R_0 :

$$U = \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\pi R_0^2}{c} \frac{d\bar{B}}{dt} \quad (7.3)$$

$$\mathcal{E} = \frac{U}{2\pi R_0} = \frac{R_0}{2c} \frac{d\bar{B}}{dt} \quad (7.4)$$

По касательной к окружности на электроны действует электрическая сила:

$$F = e\mathcal{E} = \frac{eR_0}{2c} \frac{d\bar{B}}{dt} \quad (7.5)$$

Уравнение движения вдоль этой окружности:

$$\frac{d}{dt}(mv_\theta) = \frac{eR_0}{2c} \frac{d\bar{B}}{dt} \quad (7.6)$$

В процессе движения радиус орбиты должен оставаться постоянным. На устойчивой орбите центробежная сила уравнивается силой Лоренца

$$\frac{mv_\theta^2}{R_0} = \frac{e}{c} v_\theta B_0, \quad (7.7)$$

где B_0 – магнитная индукция на радиусе R_0 .

Отсюда $mv_\theta = \frac{eR_0}{c} B_0$ и с учётом того, что $R_0(t) = Const$

$$\frac{d}{dt}(mv_\theta) = \frac{eR_0}{c} \frac{dB_0}{dt} \quad (7.8)$$

Одновременное выполнение условий (7.6) и (7.8) даёт:

$$\frac{eR_0}{2c} \frac{d\bar{B}}{dt} = \frac{eR_0}{c} \frac{dB_0}{dt} \quad (7.9)$$

$$\frac{d\bar{B}}{dt} = 2 \frac{dB_0}{dt} \quad (7.10)$$

Последнее уравнение называют бетатронным соотношением или условием 2:1. Если магнитное поле в межполюсном зазоре возрастает от нулевого значения, то его можно представить в другом виде. Полагая $B_0 = \bar{B} = 0$ при $t = 0$ и интегрируя выражение (7.10), получаем:

$$\bar{B}(t) = 2B_0(t) \quad (7.11)$$

Таким образом, на равновесной орбите выполняется бетатронное соотношение: в процессе ускорения в любой момент времени среднее значение индукции магнитного поля в круге орбиты вдвое превышает значение индукции на орбите.

7.2. Условие минимума напряжённости вихревого электрического поля

На равновесной орбите кроме выполнения бетатронного соотношения выполняется ещё условие минимума напряжённости вихревого электрического поля $\mathcal{E}(R)$:

$$\frac{\partial \mathcal{E}(R)}{\partial R} = 0 \text{ и } \frac{\partial^2 \mathcal{E}(R)}{\partial R^2} > 0 \text{ при } R = R_0.$$

Напряжённость вихревого электрического поля на любом произвольном радиусе R :

$$\mathcal{E}(R,t) = \frac{1}{2\pi R c} \dot{\Phi}(R,t) \quad (7.12)$$

Здесь и далее точкой обозначены производные по времени t .

Магнитный поток в круге с радиусом R [2]:

$$\Phi(R,t) = \Phi_c(t) + \frac{2\pi R_0^n B_0(t)}{2-n} (R^{2-n} - R_c^{2-n}) \quad (7.13)$$

$$\dot{\Phi}(R,t) = \dot{\Phi}_c(t) + \frac{2\pi R_0^n R^{2-n}}{2-n} \dot{B}_0(t) - \frac{2\pi R_0^n R_c^{2-n}}{2-n} \dot{B}_0(t) \quad (7.14)$$

где $\Phi_c(t)$ – магнитный поток в сердечнике, R_c – радиус сердечника.

$$\frac{\partial \mathcal{E}(R)}{\partial R} = \frac{1}{2\pi R c} \frac{\partial \dot{\Phi}(R,t)}{\partial R} - \frac{\dot{\Phi}(R,t)}{2\pi c R^2} \quad (7.15)$$

$$\frac{\partial \dot{\Phi}(R,t)}{\partial R} = \frac{2\pi R_0^n R^{1-n}}{(2-n)} (2-n) \dot{B}_0(t) \quad (7.16)$$

Поделив и умножив последнее уравнение на R^n и учтя, что

$$B(R,t) = B_0(t) \frac{R_0^n}{R^n} \text{ и } \dot{B}(R,t) = \dot{B}_0(t) \frac{R_0^n}{R^n} \quad (7.17)$$

получаем:

$$\frac{\partial \dot{\Phi}(R,t)}{\partial R} = \dot{B}(R,t) \cdot 2\pi R \quad (7.18)$$

После подстановки в (7.15) имеем:

$$\frac{\partial \mathcal{E}(R,t)}{\partial R} = \frac{\dot{B}(R,t)}{c} - \frac{\dot{\Phi}(R,t)}{2\pi c R^2} \quad (7.19)$$

Запишем последнее уравнение при $R = R_0$.

$$\left. \frac{\partial \mathcal{E}(R,t)}{\partial R} \right|_{R=R_0} = \frac{\dot{B}(R_0,t)}{c} - \frac{\dot{\Phi}(R_0,t)}{2\pi c R_0^2} \quad (7.20)$$

и учтём: $\Phi(R_0,t) = \pi R_0^2 \bar{B}(R_0,t)$; $\dot{\Phi}(R_0,t) = \pi R_0^2 \dot{\bar{B}}(R_0,t)$

С учётом этого

$$\left. \frac{\partial \mathcal{E}(R,t)}{\partial R} \right|_{R=R_0} = \frac{1}{c} \left(\dot{B}_0(R_0,t) - \frac{\dot{\bar{B}}(R_0,t)}{2} \right) = 0, \quad (7.21)$$

так как на равновесной орбите выполняется условие $2\dot{B}_0(t) = \dot{\bar{B}}(t)$.

Найдём вторую производную

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}(R,t)}{\partial R^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial \dot{B}(R,t)}{\partial R} - \frac{1}{2\pi c R^2} \frac{\partial \dot{\Phi}(R,t)}{\partial R} + \frac{\dot{\Phi}(R,t)}{\pi c R^3} \quad (7.22)$$

После подстановки

$$\frac{\partial \dot{B}(R,t)}{\partial R} = -\dot{B}_0(t) R_0^n n R^{-(n+1)} \quad (7.23)$$

и $\frac{\partial \dot{\Phi}(R,t)}{\partial R}$ по формуле (7.16) получаем:

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}(R,t)}{\partial R^2} = -\frac{\dot{B}(R,t)n}{cR} - \frac{\dot{B}(R,t)}{cR} + \frac{\dot{\Phi}(R,t)}{\pi c R^3} \quad (7.24)$$

На равновесной орбите $\frac{\dot{\Phi}(R_0,t)}{\pi R_0^2} = \dot{B}(R_0,t)$ и $\dot{B}(R_0,t) = 2\dot{B}_0(R_0,t)$.

Поэтому $\left. \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial R^2} \right|_{R=R_0} = \frac{\dot{B}_0(R_0,t)}{cR_0} (1-n) > 0$.

Итак: $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial R} = 0$ и $\frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial R^2} > 0$, то есть на орбите R_0 вихревое поле мини-

мально.

Радиус равновесной орбиты можно определить двумя методами:

- а) из бетатронного условия $\bar{B} = 2B_0$;
- б) из условия минимума напряжённости вихревого электрического поля на орбите R_0 .

В первом случае нужно построить зависимости $\bar{B}(R)$ и $2B_0(R)$ (рис. 7.1). При отсутствии насыщения в галетах условие 2 : 1 справедливо и при амплитудных значениях магнитного поля. Поэтому удобно измерять амплитудные значения поля на орбите радиуса $R - B_a(R)$ и среднего поля внутри орбиты $-\bar{B}_a(R)$. Точка пересечения этих зависимостей соответствует радиусу равновесной орбиты.

Во втором случае строится зависимость напряжённости вихревого поля от радиуса (рис. 7.2). Положение минимума этой зависимости даёт искомый радиус.

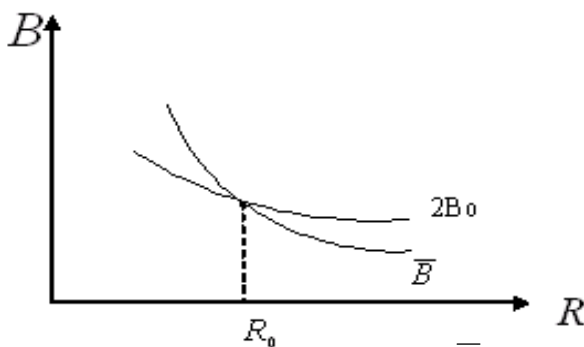


Рис. 7.1. Зависимости B_0 и \bar{B} от радиуса

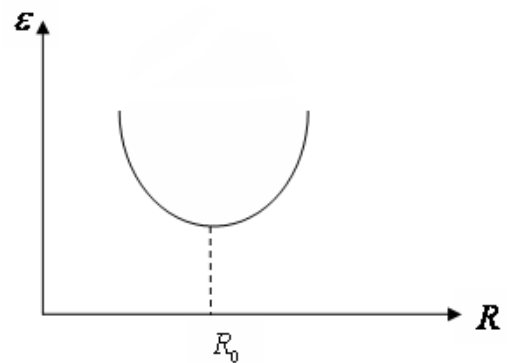
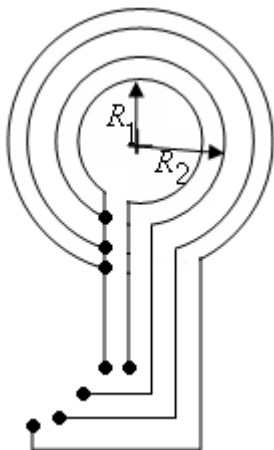


Рис. 7.2. Зависимость $\mathcal{E}(R)$

7.3. Определение R_0 из бетатронного условия

Измерения производят с помощью специального диска, расположенного в медианной плоскости межполюсного зазора и одетого на центральный сердечник. На диске по окружностям протачиваются канавки, в каждую из которых укладывается по одному витку. Схема соединения витков показана на рис. 7.3. ЭДС, наводимая в витке на радиусе R_i [2]:

$$U(R_i) = 4,44 f \Phi(R_i) \cdot 10^{-8} \text{ вольт} = 4,44 f \bar{B}(R_i) \cdot \pi R_i^2 \cdot 10^{-8},$$



где $\Phi(R_i)$ – амплитуда магнитного потока внутри витка с радиусом R_i , а $\bar{B}(R_i)$ – среднее значение индукции внутри этого витка, f – частота промышленной сети. Отсюда

$$\bar{B}(R_i) = \frac{1}{4,44 f \pi \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{U(R_i)}{R_i^2} = C \frac{U(R_i)}{R_i^2},$$

где $C = \frac{1}{4,44 f \pi \cdot 10^{-8}} = \text{Const}$. $B(R)$ определяется по разности ЭДС двух соседних витков.

Рис. 7.3. Схема соединения измерительных витков

Магнитный поток $\Delta\Phi_i$ в кольце с радиусами R_i и R_{i+1} :

$$\Delta\Phi_i = \Phi(R_{i+1}) - \Phi(R_i) = \frac{U(R_{i+1})}{4,44 f \cdot 10^{-8}} - \frac{U(R_i)}{4,44 f \cdot 10^{-8}} = \frac{\Delta U_i}{4,44 f \cdot 10^{-8}},$$

где $\Delta U_i = U(R_{i+1}) - U(R_i)$.

Площадь кольца $S_i \approx 2\pi R_{cpi} \Delta R$, где $R_{cpi} = (R_i + R_{i+1})/2$ – средний радиус кольца, $\Delta R = (R_{i+1} - R_i)$ – ширина кольца.

Среднее значение индукции на радиусе R_{cpi} :

$$B(R_{cpi}) = \frac{\Delta\Phi_i}{2\pi R_{cpi} \Delta R_i} = \frac{\Delta U_i}{4,44 f \cdot 10^{-8} 2\pi R_{cpi} \Delta R} = C \frac{\Delta U_i}{2R_{cpi} \Delta R}.$$

При построении графиков на рисунке 7.1 можно не вычислять значения B и \bar{B} , а использовать величины им пропорциональные

$$\bar{B}(R) \sim \frac{U}{R^2} \text{ и } 2B(R) \sim \frac{\Delta U}{R_{cp} \Delta R}.$$

Использование в расчётах экспериментальных значений $U(R)$ может привести к значительной ошибке определения радиуса орбиты. Прежде всего, это связано с низкой точностью нахождения величины ΔU и, следовательно, неопределённостью аппроксимации функции

$\frac{\Delta U}{R_{cp}\Delta R} = f_2(R_{cp})$. Ошибка определения ΔU обусловлена не только погрешностью измерительного устройства, но и случайными флуктуациями напряжения сети в процессе измерений, отклонениями радиусов витков от расчётных значений. Более точный результат можно получить, если зависимость $U(R)$ предварительно сгладить методом наименьших квадратов. Сглаживание и вычисление функций $\frac{U}{R^2} = f_1(R)$ и $\frac{\Delta U}{R_{cp}\Delta R} = f_2(R_{cp})$ осуществляется с помощью компьютерной программы

Radius. Зависимость $U(R)$ аппроксимируется полиномом второй степени:

$$U(R) = a_0 + a_1R + a_2R^2. \quad (7.25)$$

По этой формуле вычисляются значения U , используемые при вычислении функций $f_1(R)$ и $f_2(R_{cp})$.

7.4. Определение R_0 по минимуму напряжённости вихревого поля

Если в плоскости равновесной орбиты на разных радиусах уложить витки, намотанные из проволоки одной и той же длины L , то разность потенциалов на концах таких катушек будет пропорциональна напряжённости вихревого электрического поля на радиусе катушки. Действительно, ЭДС $U(R)$ одного витка с радиусом R :

$U(R) = \frac{U_{кат}(R)}{n}$, где $n = \frac{L}{2\pi R}$ – число витков, а $U_{кат}$ – разность потенциалов на концах катушки.

$$\text{Напряжённость поля } \mathcal{E}(R) = \frac{U(R)}{2\pi R} = \frac{U_{кат}(R)}{L} = U_{кат}(R)/L.$$

Измерительные витки, намотанные из проволоки одинаковой длины, укладываются на том же диске, который используется для определения положения радиуса равновесной орбиты в предыдущем методе.

7.5. Лабораторная работа № 7

Цель работы

- Определение радиуса равновесной орбиты в бетатроне двумя методами.
1. Установить измерительный диск строго в медианной плоскости межполюсного зазора.
 2. Подать напряжение на первичную обмотку электромагнита.
 3. Измерить напряжение U на каждом витке и разность напряжений ΔU между двумя соседними витками. Радиусы витков указаны в табл. 1.

Таблица 1

Радиусы витков на измерительных дисках

	Радиусы витков, мм								
Магнит №1	78	88	98	108	118	128	138	148	158
Магнит №2	80	90	100	110	120	130	140	150	160

4. Данные измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Измерение радиуса R_0 из условия 2:1

R									
U									
U/R^2									
R_{cp}									
ΔR									
ΔU									
$\Delta U/R_{cp} \Delta R$									

5. Вычислить $\frac{U}{R^2}$ и $\frac{\Delta U}{R_{cp} \Delta R}$ и построить зависимости $\frac{U}{R^2} = f_1(R)$ и $\frac{\Delta U}{R_{cp} \Delta R} = f_2(R_{cp})$. Определить радиус равновесной орбиты.
6. Запустить программу **Radius**.

Окно управления программой показано на рис. 7.4.

При запуске программы в список 1 заносятся данные по умолчанию для демонстрации работы программы. Отображение графиков осуществляется нажатием кнопки 5. Для получения координат точек пересечения графиков галочка 6 должна быть активирована. Для ввода исходных значений U и R нужно очистить список 1 нажатием кнопки 8 и заполнить список 1, поочередно вводя данные в поля 2 и добавляя их нажатием кнопки 4. Значения, содержащие десятые и сотые доли должны разделяться точкой (запятая не принимается).

Для нахождения точки пересечения графиков уравнения для функций $f_1(R)$ и $f_2(R_{cp})$ приравниваются друг к другу. Решением полученного квадратного уравнения находится значение радиуса точки пересечения.

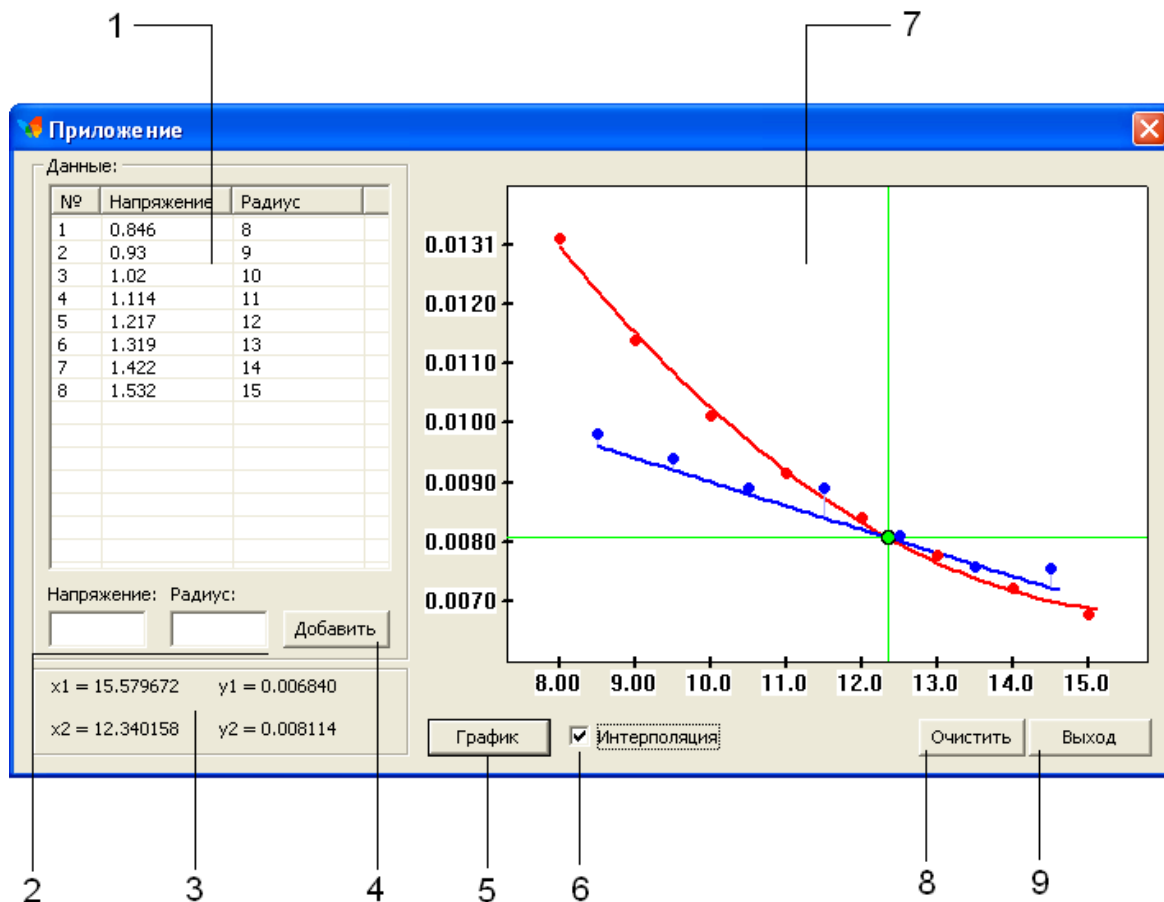


Рис. 7.4. Окно программы:

1 – Список исходных данных; 2 – поля для ввода значений напряжения и радиуса; 3 – координаты точек пересечения графиков $f_1(R)$ и $f_2(R_{cp})$; 4 – кнопка для добавления исходных данных; 5 – кнопка показа графиков; 6 – окно индикации использования интерполяции; 7 – поле отображения графиков $f_1(R)$ и $f_2(R_{cp})$; 8 – кнопка очистки поля 7 и списка 1; 9 – кнопка выхода из программы

7. Найденный радиус равновесной орбиты сравнить с полученным в результате вычислений согласно пункту 5.
8. Воспользовавшись измерениями ЭДС, наводимыми на витках уложенных на разных радиусах (пункт 3), найти напряжённости поля на этих радиусах:

$$\varepsilon(R) = \frac{U(R)}{2\pi R}$$

Построить график $\varepsilon = f(R)$ и по минимуму кривой найти R_0 .

7.6. Контрольные вопросы

1. Что будет происходить с равновесным радиусом R_0 в процессе ускорения, если начнёт сказываться насыщение стали галет?
2. Как меняется равновесный радиус при нарушении условия «2:1»?
3. Как откорректировать положение радиуса равновесной орбиты на уже изготовленном электромагните?

7.7. Список литературы

1. Ананьев Л.М., Воробьёв А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 350 с.
2. Степанов Ю.М. Расчёт электромагнита индукционного ускорителя электронов – бетатрона: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006 – 78 с.

8. РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕЖПОЛЮСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ УСКОРИТЕЛЯ С МЯГКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

8.1. Пространственная устойчивость ускоряемого пучка частиц

Для обеспечения устойчивого движения электронов по равновесной орбите в магнитном поле межполюсного пространства необходимо наличие фокусирующих сил, действующих на те частицы, которые по тем или иным причинам отклонились от равновесной орбиты в вертикальном или радиальном направлениях. Движение в вертикальной плоскости будет устойчивым, если магнитное поле в межполюсном зазоре спадает по радиусу. Для этого воздушный зазор между полюсами увеличивается по мере удаления от центра. В этом случае силовые линии магнитного поля выгибаются в направлении от центра, создавая так называемое «бочкообразное» поле. Появляется радиальная компонента поля B_r , которая обуславливает появление силы Лоренца $\vec{F} = \frac{q}{c} [\vec{V}_\theta \vec{B}_r]$. Последняя и является фокусирующей, так как всегда направлена против направления смещения частиц от медианной плоскости в вертикальном направлении. Такой способ фокусировки используется в ускорителях с мягкой фокусировкой. В этих ускорителях магнитное поле изменяется по радиусу по закону:

$$B = Const \frac{1}{R^n}, \quad (8.1)$$

где n называют показателем спада магнитного поля по радиусу. Очевидно, что поле уменьшается по радиусу если n – положительное число. Поэтому условием вертикальной фокусировки является выполнение неравенства $n > 0$.

На равновесной орбите при $R = R_0$

$$B_0 = \frac{Const}{R_0^n}. \quad (8.2)$$

Подставляя в уравнение (8.1) $Const = B_0 R_0^n$, получаем закон радиального распределения магнитного поля в медианной плоскости межполюсного зазора:

$$B(R) = B_0(R_0) \frac{R_0^n}{R^n}. \quad (8.3)$$

При отклонении радиуса орбиты от равновесного нарушается равновесие центростремительной силы Лоренца и центробежной силы. Движение в радиальной плоскости будет устойчивым, если результирующая сила направлена против направления смещения частиц. Сила Лоренца с учетом формулы (8.3)

$$F_{\perp} = \frac{e}{c} V B = \frac{e V B_0 R_0^n}{c} \cdot \frac{1}{R^n} \sim \frac{1}{R^n}, \quad (8.4)$$

а центробежная сила

$$F_{\text{ц}} = \frac{m V^2}{R} \sim \frac{1}{R}. \quad (8.5)$$

Результирующая сила будет фокусирующей, если сила Лоренца при изменении радиуса меняется медленнее центробежной силы, т. е. если $n < 1$. Таким образом, условие одновременной фокусировки и в вертикальной и в радиальной плоскостях в ускорителях с мягкой фокусировкой можно записать в виде:

$$0 < n < 1. \quad (8.6)$$

Обычно показатель спада лежит в диапазоне $n = 0,5 \div 0,8$. В бетатронах Томского политехнического университета $n = 2/3$.

Продифференцируем выражение (8.3) по R при $n(R) = Const$

$$\frac{\partial B}{\partial R} = -B_0 R_0^n \frac{n}{R^{n+1}} = -B_0 \frac{R_0^n}{R^n} \cdot \frac{n}{R} = -B \frac{n}{R}. \quad (8.7)$$

Отсюда

$$n = -\frac{\partial B}{\partial R} \frac{R}{B}. \quad (8.8)$$

8.2. Измерение показателя спада магнитного поля

Для нахождения показателя спада необходимо измерить зависимость магнитного поля от радиуса $B(R)$. Для этого используется измерительная катушка небольших размеров с большим числом витков. Наводимая на концах катушки ЭДС:

$$U = 4,44 f \cdot \Phi \cdot n \cdot 10^{-8} \text{ вольт.} \quad (8.9)$$

Здесь f – частота сети, n – число витков в катушке, Φ – амплитуда магнитного потока через сечение катушки в Мкс. Записывая поток Φ через усредненную по сечению катушки амплитуду индукции B $\Phi = BS_{кат}$, где $S_{кат}$ – площадь сечения катушки, получаем:

$$U = 4,44 f \cdot S_{кат} \cdot n \cdot 10^{-8} \cdot B. \quad (8.10)$$

Отсюда:

$$B = \frac{U}{4,44 f \cdot S_{кат} \cdot n \cdot 10^{-8}} = KU, \quad (8.11)$$

где $K = \frac{1}{4,44 f \cdot S_{кат} \cdot n \cdot 10^{-8}} = Const$.

Переходя в формуле (8.8) к конечным приращениям, получаем:

$$n(R_{cp}) = -\frac{\Delta B}{\Delta R} \cdot \frac{R_{cp}}{B_{cp}}, \quad (8.12)$$

где $\Delta B = B_{i+1} - B_i$; $\Delta R = R_{i+1} - R_i$; $R_{cp} = \frac{(R_{i+1} + R_i)}{2}$; $B_{cp} = \frac{(B_{i+1} + B_i)}{2}$.

Здесь i – номер точки на кривой $B(R)$.

Измеряя напряжение на зажимах измерительной катушки, устанавливаемой через одинаковые расстояния ΔR вдоль радиуса, по формуле (8.12) определяют значение n . С учетом формулы (8.11)

$$n(R_{cp}) = -\frac{\Delta U}{U_{cp}} \cdot \frac{R_{cp}}{\Delta R}, \quad (8.13)$$

где $\Delta U = U_{i+1} - U_i$; $U_{cp} = \frac{(U_{i+1} + U_i)}{2}$.

Этот метод дает большую погрешность в определении n из-за ошибок измерения напряжения в отдельных точках. Поэтому его иногда используют в ускорительных установках с небольшими радиусами при условии хорошей стабилизации напряжения на намагничивающей обмотке электромагнита.

Большую точность можно получить с использованием графоаналитического метода, когда при расчете n используются не измеренные

значения U_i , а найденные по усредненной кривой, построенной по экспериментальным точкам. В этом случае ΔU и ΔU_{cp} находятся из графических построений (рис. 8.1). Точность определения n зависит от точности измерения $U = f(R)$ и точности графических построений. С увеличением радиуса погрешность определения показателя спада увеличивается и при радиусах порядка 100 см становится практически недопустимой. Применение дифференциального метода измерения зависимости $U = f(R)$ вместо прямого позволяет значительно увеличить точность определения показателя спада. В этом случае применяются две встречно включенные измерительные катушки, одна из которых устанавливается неподвижно и напряжение на ней $U_H = Const$, а другая передвигается по радиусу, и измеряется разность напряжений $\Delta U_i = U_i - U_H$ (рис. 8.1). Значение n определяется по формуле:

$$n(R_{cp}) = - \frac{\Delta U_{i+1} - \Delta U_i}{\Delta U_{cp} + U_H} \cdot \frac{R_{cp}}{\Delta R} \quad (8.14)$$

первым или вторым описанными выше методами.

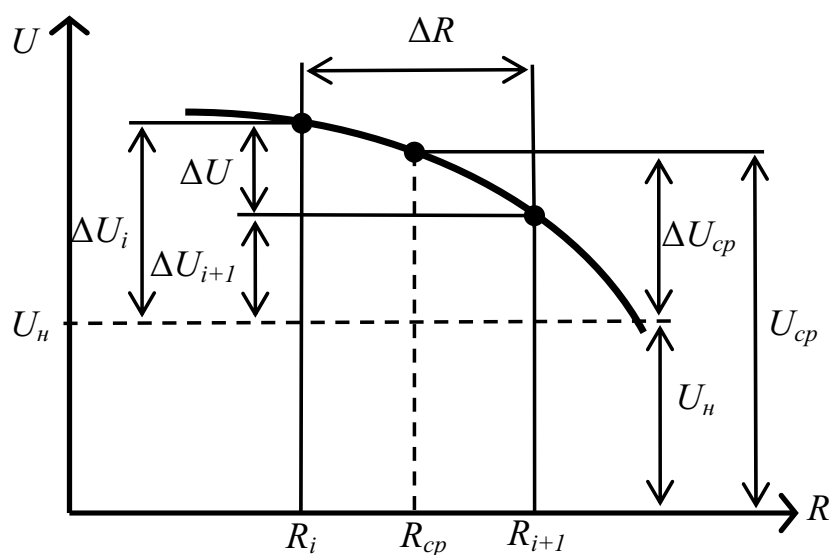


Рис. 8.1. Определение показателя спада графическим методом

Несмотря на общее повышение точности определения n , этот метод не лишен недостатка графоаналитических вычислений и, кроме этого, обладает дополнительными погрешностями, вносимыми статической и фазовой неоднородностями магнитного поля.

Лабораторная работа № 8

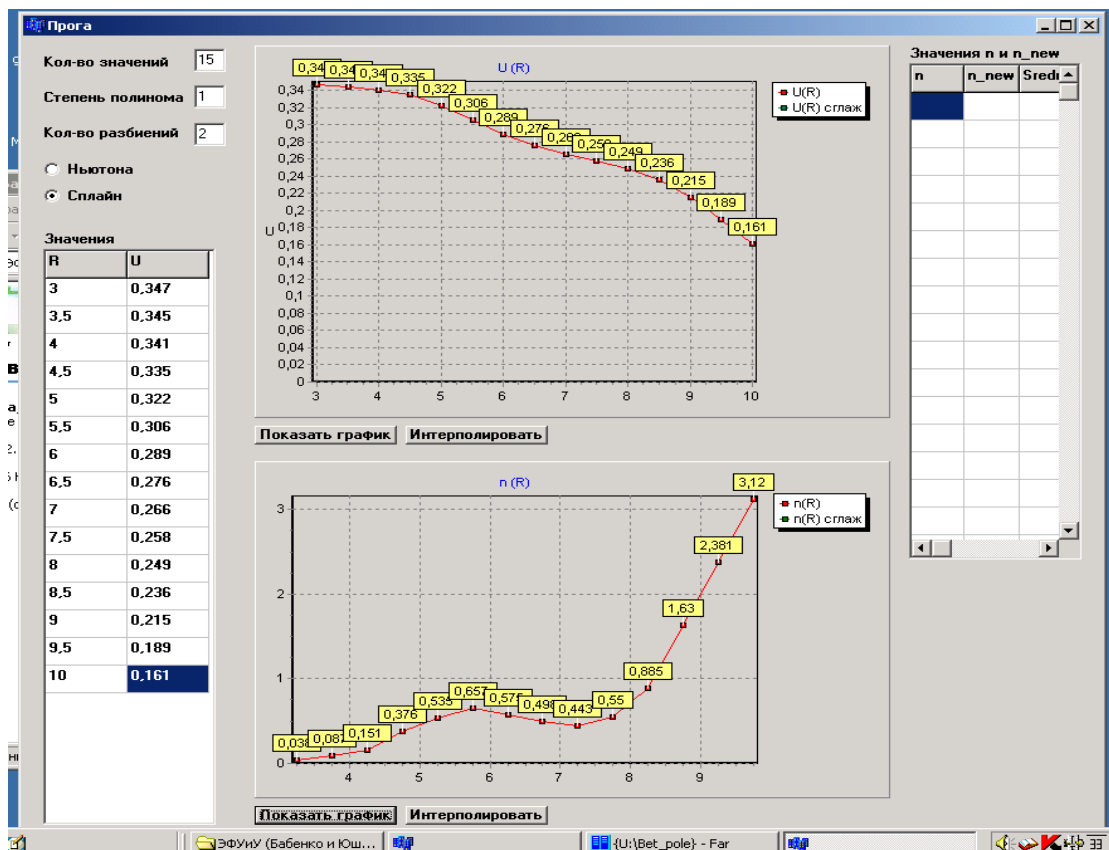
Цель работы

- Измерить показатель спада магнитного поля в межполюсном зазоре бетатрона при разных значениях поля.
1. Включить электромагнит, подав на схему силового питания напряжение (150÷170) В (ток в первичной обмотке 3,5÷4 А).
 2. Измерить зависимость от радиальной координаты (через 1 см) ЭДС $U(R)$, наводимой в измерительной катушке, в диапазоне $R = (8÷20)$ см.
 3. Произвести сглаживание экспериментальной кривой $U(R)$. Сглаживание (методом Ньютона или методом квадратичных сплайнов) и вычисление зависимости $n(R_{cp})$ по сглаженной кривой $U(R)$ по формуле (8.13) производится с помощью компьютерной программы.
 4. Запустить программу. Для этого откройте папку ЭФУиУ (на рабочем столе компьютера) и дважды кликните по значку левой кнопкой мыши. После этого откроется окно программы:



программа

значку левой кнопкой мыши. После этого откроется окно программы:



5. Значения радиусов и значения напряжения $U(R)$ ввести в соответствующие ячейки окна:

Количество вводимых данных задается числом в соответствующей ячейке **Кол-во значений** .

После введения значений необходимо поставить маркер напротив выбранного метода интерполяции

Ньютона
 Слайн

, а также, в случае метода Ньютона, задать степень полинома, введя значение в соответствующую ячейку **Степень полинома** .

Число, введенное в **Кол-во разбиений** , отвечает за количество промежуточных точек между узловыми.

Для построения графика зависимости $U(R)$ необходимо нажать на кнопку **Показать график** в верхней половине окна программы.

Для интерполяции графика зависимости $U(R)$ необходимо нажать на кнопку **Интерполировать** в верхней половине окна программы.

Для построения графика зависимости $n(R_{cp})$ необходимо нажать на кнопку **Показать график** в нижней половине окна программы. При этом значения показателя спада подсчитываются по экспериментальным значениям $U(R)$.

Для построения зависимости $n(R_{cp})$, найденной по интерполированной зависимости $U(R)$, необходимо нажать на кнопку **Интерполировать** в нижней половине окна программы. При этом вычисленные значения радиуса (R_{cp}) и показателя спада (n) появятся в соответствующих ячейках крайнего правого окна.

6. Снизить вдвое напряжение питания электромагнита и повторить измерение зависимости $n(R_{cp})$.

Для завершения работы программы необходимо нажать на кнопку в правом верхнем углу экрана или комбинацию клавиш Alt+F4 на клавиатуре.

7. Построить вычисленные зависимости $n(R_{cp})$ на одном графике и определить рабочую область межплюсового зазора.

R	U

n	n_new	Sredi ▲

8.4. Контрольные вопросы

1. Как и почему форма сечения ускоренного пучка зависит от величины показателя спада магнитного поля n ?
2. С какой целью центральный сердечник в межполюсном зазоре заменяется набором дисков (галет)?
3. Как можно подкорректировать значение показателя спада на уже изготовленном электромагните?

8.5. Список литературы

1. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 350 с.
2. Степанов Ю.М. Расчёт электромагнита индукционного ускорителя электронов – бетатрона: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 78 с.
3. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. – М.: Атомиздат, 1975. – 368 с.
4. Дж. Ливингуд. Принципы работы циклических ускорителей. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1963. – 494 с.

9. СИЛОВОЕ ПИТАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ОТ ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ С ЧАСТОТОЙ 50 ГЦ

9.1. Схема силового питания

Из используемых систем силового питания переменных электромагнитов наиболее проста система питания от промышленной сети с частотой 50 Гц. Наличие большого воздушного зазора между полюсами, представляющего для магнитного потока большое сопротивление, обуславливает большое число ампер-витков и потребление значительной реактивной мощности. При значительной индуктивности намагничивающей обмотки питание ее переменным током связано с низким значением $\cos\varphi$. Поэтому используется резонансная схема питания обмотки. Параллельно намагничивающей обмотке W_2 подключается конденсаторная батарея C . Индуктивность намагничивающей (вторичной) обмотки и емкость конденсаторной батареи образуют резонансный контур. Емкость конденсаторной батареи подбирается таким образом, чтобы собственная частота полученного колебательного контура равнялась частоте питающего тока, т. е. чтобы контур был настроен в резонанс с

частотой сети. В этом случае из сети потребляется мощность, идущая лишь на компенсацию потерь энергии в контуре. Для возбуждения контура используется возбуждающая (первичная) обмотка W_1 .

Схема силового питания показана на рис. 9.1.

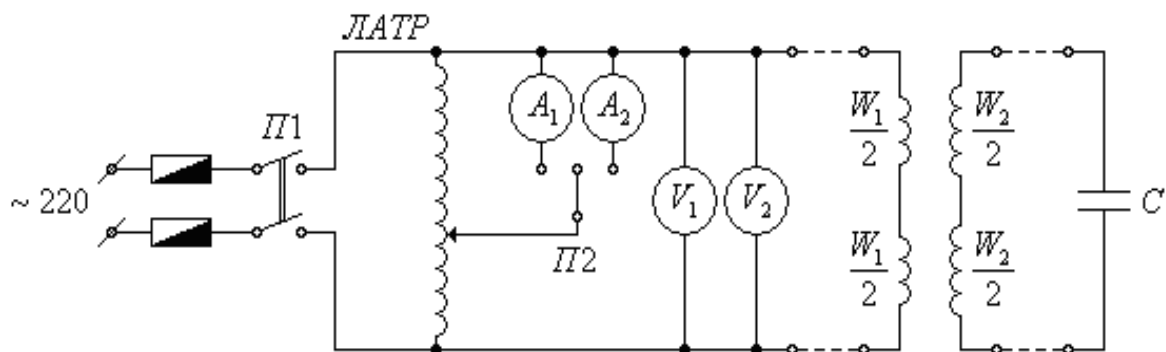


Рис. 9.1. Схема силового питания от промышленной сети

Автотрансформатор (ЛАТР) позволяет плавно регулировать напряжение, подаваемое на первичную обмотку W_1 , меняя тем самым амплитуду тока во вторичной (намагничивающей) обмотке и, следовательно, амплитуду индукции магнитного поля в межполюсном зазоре. Напряжение на первичной обмотке и ток через обмотку измеряется вольтметром V и амперметром A . Применение двух амперметров с разными пределами измерения связано с необходимостью измерения больших токов при настройке резонанса – при расстроенном резонансе первичная обмотка потребляет большой ток, значительно превышающий рабочий. Как первичная, так и вторичная обмотки состоят из двух одинаковых половин, расположенных на верхнем и нижнем полюсах. Половины как вторичной, так и первичной обмоток должны быть включены последовательно, чтобы магнитные потоки, создаваемые каждой из них, были направлены в одну сторону. При неправильно встречном включении, например, половин первичной обмотки ток в ней будет велик, а во вторичной обмотке тока не будет. Вторичная обмотка наматывается проводом большого сечения, т.к. для создания магнитного поля в большом воздушном зазоре необходим большой ток. Сечение провода первичной обмотки берется с запасом, т.к. при расстроенном контуре она потребляет тем больший ток, чем сильнее степень расстройки резонанса.

9.2. Настройка резонанса

Настройка системы силового питания сводится к определению необходимой емкости конденсаторной батареи C и настройке точного резонанса контура вторичной обмотки с частотой питающего тока.

Частота резонансного контура, не содержащего активного сопротивления:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (9.1)$$

При известной индуктивности L по этой формуле находят необходимое значение резонансной емкости $C_{рез}$, при которой собственная частота контура вторичной обмотки будет равна частоте сети $\omega = 2\pi f$ ($f = 50$ Гц):

$$C_{рез} = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (9.2)$$

При подключении вторичной обмотки к сети по схеме, показанной на рис. 9.2, то если пренебречь ее активным сопротивлением R , т. е. если $R \ll \omega L$, в ней будет протекать ток

$$I = \frac{U}{\omega L} \quad (9.3)$$

где U – напряжение на обмотке, $\omega = 2\pi f$ – частота промышленной сети, L – индуктивность обмотки. Таким образом, измеряя напряжение на обмотке и ток в ней, по формуле (9.3) можно найти индуктивность обмотки L и по формуле (9.2) оценить необходимую емкость конденсаторной батареи.

В этих расчетах не учитывается наличие активного сопротивления и потерь в контуре. Поэтому найденное значение емкости $C_{рез}$ является ориентировочным и используется для предварительной сборки конденсаторной батареи. Окончательная точка настройки резонанса осуществляется на собранной схеме питания (рис. 9.1). При совпадении резонансной частоты контура вторичной обмотки с частотой питающей сети ток в первичной обмотке имеет минимальное значение. Изменяя ток в первичной обмотке I_1 в зависимости от емкости батареи C , находят значение емкости, соответствующей минимуму тока. Для этого конденсаторная батарея собирается таким образом, чтобы с помощью конденсаторов небольшой емкости иметь возможность менять емкость батареи в большую и меньшую сторону относительно найденного ранее ориен-

тировочного значения. Примерный вид резонансных кривых показан на рис. 9.2. при увеличении напряжения на первичной обмотке увеличивается ток в обмотке и резонансная кривая становится острее.

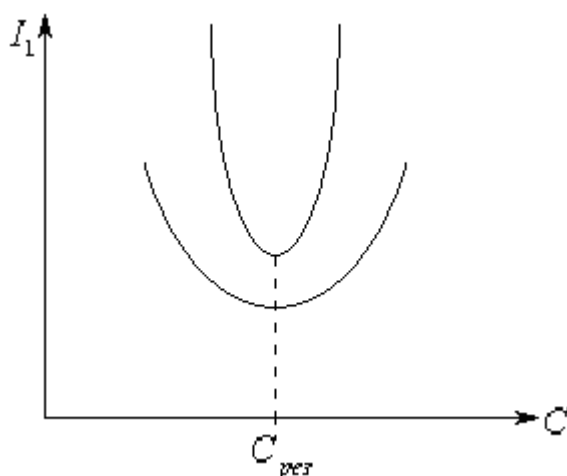


Рис. 9.2. Резонансные кривые

Вначале значение резонансной емкости находят при малом напряжении на первичной обмотке. Затем напряжение увеличивают и выполняют окончательную тонкую подстройку резонанса.

9.3. Лабораторная работа № 9

Цель работы

- Определение индуктивности намагничивающей обмотки и расчет резонансной емкости конденсаторной батареи;
 - сборка схемы силового питания электромагнита;
 - снятие резонансных кривых и настройка резонанса.
1. Собрать схему, показанную на рис. 9.3.

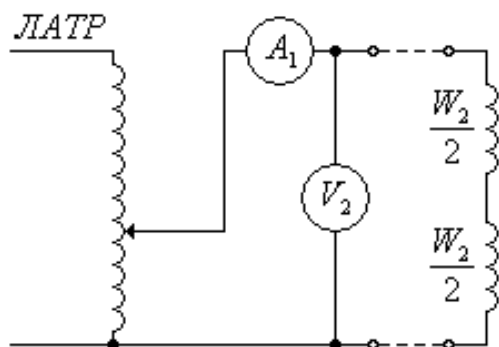
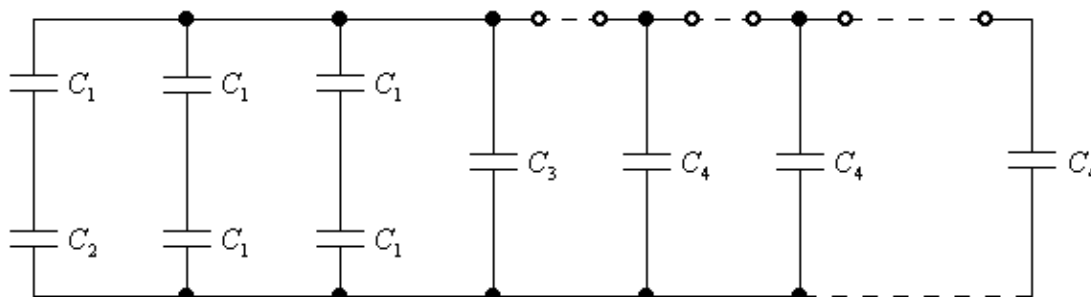


Рис. 9.3. Определение индуктивности вторичной обмотки

Концы первичной и вторичной обмоток, выводы конденсаторной батареи, питающий провод вынесены на монтажную панель. Все соединения, показанные на рис. 9.1 и 9.3 пунктиром, выполняются на этой панели.

2. Подать напряжение на вторичную обмотку от автотрансформатора (переключателем $П1$, расположенным на левой боковой панели подставки под магнит) и измерить ток в обмотке при нескольких значениях напряжения. Для более точного измерения напряжения параллельно щитовому вольтметру V_1 на лицевой панели подставки подключен зеркальный вольтметр V_2 .
3. По формуле (9.3) найти значение индуктивности в каждом опыте и подсчитать среднее арифметическое значение.
4. по формуле (9.2) подсчитать необходимое значение емкости конденсаторной батареи.
5. Собрать схему, показанную на рис. 9.1.
6. Снять зависимость тока в первичной обмотке I_1 от емкости конденсаторной батареи C . Схема соединений конденсаторов в батарее показана на рис. 9.4, где пунктиром показаны соединения с помощью съемных перемычек.



$$C_1 = 100 \text{ мкФ}; C_2 = 118 \text{ мкФ}; C_3 = 0,25 \text{ мкФ}; C_4 = 2 \text{ мкФ}$$

Рис. 9.4. Схема конденсаторной батареи

Емкость батареи менять через 2 мкФ последовательным снятием перемычек. Измерение целесообразно начинать со значения емкости, соответствующей максимальной расстройке резонанса, чтобы исключить зашкаливание амперметра.

Измерения выполнить при двух значениях напряжения на первичной обмотке. При переходе на более высокое напряжение на первичной обмотке необходимо использовать амперметр с большим пределом измерения и уменьшить диапазон изменения емкости в окрестности резонансного значения. Переключатель амперметров $П2$ смонтирован на лицевой панели подставки магнита.

Внимание! Напряжение на конденсаторах достигает нескольких киловольт. Последовательность действий при переключении конденсаторов должна быть такой:

- *Переключателем П1 отключить питание электромагнита.*
- *Подсоединить заземляющую штангу к цепи конденсаторов, на которой производится переключение.*
- *Выполнить необходимое переключение.*
- *Снять заземляющую штангу.*
- *Включить питание переключателем П1.*

Все эти манипуляции должны осуществляться **одним и тем же лицом.**

7. По резонансным кривым определить $C_{рез}$ и сравнить с рассчитанным по формуле (9.2) значением.

9.4. Контрольные вопросы

1. Почему значение $C_{рез}$, найденное по формуле (9.2), несколько отличается от полученного из резонансных кривых?
2. Обязаны ли совпадать значения $C_{рез}$ на резонансных кривых, снятых при разных напряжениях на первичной обмотке электромагнита?
3. Нарисовать и объяснить полную схему резонансного контура, образованного вторичной обмоткой и конденсаторной батареей.

9.5. Список литературы

1. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронных – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 350 с.
2. Москалев В.А. Бетатроны. – М.: Энергоиздат, 1981. – 167 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ.....	3
1.1. Принцип действия линейного резонансного ускорителя электронов.....	3
1.1.1. Движение электронов в поле волны с $v_\phi < c$	5
1.1.2. Движение электрона в поле волны с $v_\phi = c$	6
1.1.3. Группировка частиц в сгустки.....	7
1.2. Ускоритель ЭЛУ-4	14
1.2.1. Компонировка ускорителя	14
1.2.2. ВЧ – тракт	15
1.2.3. Волновод	16
1.2.4. Инжектор.....	17
1.2.5. Фокусировка пучка	17
1.2.6. Модулятор.....	18
1.2.7. Регулировка и измерение параметров пучка.....	20
1.3. Порядок включения и отключения ускорителя	20
1.3.1. Порядок включения ускорителя	20
1.3.2. Порядок выключения ускорителя	22
1.3.3. Порядок временного выключения ускорителя	22
1.4. Лабораторная работа № 1.....	23
1.5. Контрольные вопросы	24
1.6. Список литературы	24
2. МИКРОТРОН	24
2.1. Введение	24
2.2. Принцип действия микротрона	25
2.3. Инжекция электронов в микротроне	29
2.4. Орбитальная устойчивость	31
2.5. Фазовое движение в микротроне	31
2.6. Микротрон с перестраиваемой энергией ускоренных электронов.....	33
2.7. Экспериментальная установка на основе микротрона с перестраиваемой энергией	36
2.8. Порядок включения и выключения ускорителя	38
2.8.1. Включение ускорителя	38
2.8.2. Временное выключение ускорителя	39
2.8.3. Выключение ускорителя	39
2.9. Лабораторная работа № 2.....	40
2.10. Контрольные вопросы	40
2.11. Список литературы	41
3. БЕТАТРОН	41
3.1. Принцип действия бетатрона.....	41
3.2. Бетатрон МИБ-6Э	45
3.2.2. Вывод электронного пучка	49
3.2.3. Инжекция электронов.....	51
3.2.4. Ускорительная камера	52
3.2.5. Пульт управления.....	52

3.3. Экспериментальная установка	54
3.3.1. Состав установки.....	54
3.3.2. Работа с дозиметром	55
3.3.3. Программа move.for	56
3.4. Лабораторная работа № 3.....	57
3.5. Контрольные вопросы	59
3.6. Список литературы	59
4. ВВОД ЭЛЕКТРОНОВ НА РАВНОВЕСНУЮ ОРБИТУ (ИНЖЕКЦИЯ) И СМЕЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ОРБИТЫ В БЕТАТРОНЕ	60
4.1. Инжекция электронов.....	60
4.2. Смещение электронов с равновесной орбиты	63
4.3. Лабораторная работа № 4.....	67
4.4. Контрольные вопросы	69
4.5. Список литературы	69
5. ФАЗОВАЯ И СТАТИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСКОРИТЕЛЯХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОЛЕМ	70
5.1. Фазовая и статическая неоднородности магнитного поля	70
5.2. Измерение фазовой неоднородности магнитного поля	78
5.3. Исправление фазовой неоднородности	81
5.4. Измерение статической неоднородности	82
5.5. Лабораторная работа № 5.....	83
5.6. Контрольные вопросы	84
5.7. Список литературы	85
6. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ МЕЖПОЛЮСНОГО ЗАЗОРА УСКОРИТЕЛЯ С МЯГКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ.....	85
6.1. Расчет профиля полюсов.....	85
6.2. Моделирование магнитного поля в межполюсном зазоре	89
6.3. Лабораторная работа № 6.....	90
6.4. Контрольные вопросы	92
6.5. Список литературы	92
7. РАДИУС РАВНОВЕСНОЙ ОРБИТЫ В БЕТАТРОНЕ.....	93
7.1. Бетатронное соотношение.....	93
7.2. Условие минимума напряжённости вихревого электрического поля.....	94
7.3. Определение R_0 из бетатронного условия	97
7.4. Определение R_0 по минимуму напряжённости вихревого поля.....	98
7.5. Лабораторная работа № 7.....	98
7.6. Контрольные вопросы	101
7.7. Список литературы	101

8. РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕЖПОЛЮСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ УСКОРИТЕЛЯ С МЯГКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ	101
8.1. Пространственная устойчивость ускоряемого пучка частиц	101
8.2. Измерение показателя спада магнитного поля	103
8.3. Лабораторная работа № 8.....	105
8.4. Контрольные вопросы	107
8.5. Список литературы	107
9. Силовое питание переменного электромагнита от промышленной сети с частотой 50 Гц	107
9.1. Схема силового питания	107
9.2. Настройка резонанса.....	109
9.3. Лабораторная работа № 9.....	110
9.4. Контрольные вопросы	112
9.5. Список литературы	112

Учебное издание

СТЕПАНОВ Юрий Михайлович

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Электрофизические установки и ускорители»
для магистрантов, обучающихся по магистерской программе
«Физика ускорителей» направления 010700 «Физика»

Научный редактор
доктор физико-математических наук,
профессор

Ю.Н. Адищев

Верстка
Дизайн обложки

В.П. Аршинова

*О.Ю. Аршинова
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 25.11.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 6,75. Уч.-изд. л. 6,10.

Заказ 876. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.