

## О ТРЕБОВАНИЯХ К ЭЛЕКТРОМАГНИТАМ БЕТАТРОННЫХ УСТАНОВОК И ПРИНЦИПАХ ИХ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Б. Б. ГЕЛЬПЕРИН

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

### Требования, предъявляемые к электромагнитам бетатронных установок

Электромагнит представляет собой магнитную цепь, состоящую из стальных полюсов с полюсными наконечниками, стальным ярмом и кольцевым воздушным зазором. В воздушном кольцевом зазоре и внутри кольца создается управляющее и ускоряющее магнитное поле. К этому магнитному полю предъявляется ряд важных технических условий, без выполнения которых работа бетатронной установки невозможна.

Как известно из теории бетатрона, магнитное поле электромагнита должно удовлетворять следующим условиям:

$$r_0 = \frac{1}{H_0} \sqrt{11,38E + 1,113 \cdot 10^{-5} E^2} \approx \frac{E}{300 H_0}, \quad (1)$$

$$\Phi = 2\pi r_0^2 H_0, \quad (2)$$

где  $E$  — энергия электронов в конце ускорения,

$r_0$  — радиус равновесной (стационарной) орбиты,

$H_0$  — напряженность магнитного поля в воздушном зазоре на равновесной орбите,

$\Phi$  — магнитный поток в круге с радиусом  $r_0$ .

Уравнение (1) определяет  $r_0$  для выбранного значения  $H_0$ . Уравнение (2) обеспечивает равновесную орбиту на радиусе  $r_0$ .

Для устойчивого движения электронов на орбите необходимо, чтобы изменение магнитного поля в зазоре в радиальном направлении удовлетворяло уравнению

$$H = H_0 \frac{r_0^n}{r^n}, \quad (3)$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля на произвольном радиусе  $r$ ,

$n$  — показатель спада поля, который для устойчивого движения электрона как в аксиальном, так и в радиальном направлениях должен иметь значение

$$0,5 < n < 1, \quad (4)$$

обычно принимают  $n = 0,67$ .

Величину  $n$  в рабочей области зазора можно определить для любой точки по следующей формуле:

$$n = \frac{r \cdot dH}{H \cdot dr} \quad (5)$$

Приведенные ранее требования к магнитному полю основывались на том, что магнитное поле в кольцевом зазоре идеально. В действительности оно отличается от однородного из-за несимметрии конструкции, технологических допусков (допуски на обработку, сборку и т. д.) и др.

Эта неоднородность магнитного поля вызывает искажение орбиты. Отклонение траектории электронов от окружности может достигнуть размеров, выходящих за пределы ускорительной камеры. В этом случае ускорение электронов прекратится, так как основная масса электронов осядет на стенки камеры.

Если обозначим расстояние от максимально удаленной точки искаженной орбиты до точки на идеальной окружности, расположенных на одном радиусе (максимальное искажение), через  $\Delta r_{\max}$ , то, как известно из теории,

$$\frac{\Delta r_{\max}}{r_0} = \sum_{l=1}^{l=\infty} \frac{h_l \cos(l\theta + \alpha_l)}{l^2 + n - 1} \cdot n \quad (6)$$

В правой части уравнения (6) дается сумма гармонических составляющих, полученных в результате разложения в гармонический ряд кривой распределения напряженностей магнитного поля в точках окружности радиуса  $r_0$ , где  $l$  — номер гармоники,

$h_l$  — амплитуда  $l$ -той гармоники.

$\alpha_l$  — сдвиг фазы  $l$ -той гармоники.

Ввиду того, что бетатрон возбуждается переменным током, то неоднородность магнитного поля в точках окружности орбиты будет наибольшей в момент, когда напряженность магнитного поля близка к нулю. Это значит, что неоднородность магнитного поля сказывается наиболее резко в момент инжекции электронов. Для этого случая можно записать

$$h = h_c + h_l,$$

где  $h$  — отклонение напряженности магнитного поля в зазоре от среднего значения,

$h_c$  — так называемая статическая неоднородность, обусловленная неравенством амплитуд напряженностей магнитного поля,

$h_l$  — так называемая временная неоднородность, обусловленная сдвигом фаз между напряженностями магнитного поля в различных точках окружности по отношению к одной какой-либо точке, принятой за начальную.

Наибольшее влияние имеет временная неоднородность магнитного поля. Обычно в практике бетатроностроения временная неоднородность измеряется углом  $\gamma$  — сдвига по фазе напряженности магнитного поля

$$\gamma_{\max} = \sum_{l=1}^{l=\infty} \frac{\gamma_l \cos(l\theta + \alpha_l)}{l^2 + n - 1}$$

для упрощения расчетов и с некоторым запасом значение  $\gamma_{\max}$  можно определить из уравнения

$$\gamma_{\max} = \sum_{l=1}^{l=\infty} \frac{\gamma_l \cdot n}{l^2 + n - 1} \quad (7)$$

Точно так же

$$h_{cmax} = \sum_{l=1}^{l=\infty} \frac{h_{lc} n}{l^2 + n - 1} \quad (8)$$

Наибольшее относительное отклонение напряженности магнитного поля

$$h_{max} \% = \gamma_{max} \frac{29 E}{\sqrt{U}} \frac{P_3}{P_3 + P_{\text{ц}}} (1 + m) \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где  $U$  — напряжение инжекции,

$P_3$  — магнитная проводимость воздушного кольцевого зазора,

$P_{\text{ц}}$  — магнитная проводимость центральной части магнитопровода (по вкладышам),

$m = \frac{\Phi_{\text{ц}}}{\Phi_3}$  — отношение магнитного потока в центральной части к потоку кольцевого зазора.

Из уравнения (9) вытекает, что чем больше напряжение инжекции, тем выше можно допустить  $\gamma_{max}$ . Однако увеличение напряжения инжекции удорожает инжектор и ускорительную камеру. Очевидно, что чем шире кольцевой зазор в электромагните, а следовательно, чем шире ускорительная камера, тем больше „рабочая область“ бетатрона и поэтому больше может быть допущено  $\frac{\Delta r_{max}}{r_0}$ , следовательно, можно получить выше

допуски на неоднородность магнитного поля  $\gamma_{max}$  и  $h_{cmax}$ . Следует учесть, что уширение кольцевого зазора вызывает и увеличение зазора по высоте, что влечет за собой увеличение веса установки и ее удорожание. Для того, чтобы построить электромагнит с меньшей неоднородностью магнитного поля, необходимо уяснить себе природу возникновения статической и временной неоднородности.

Статическая неоднородность возникает в основном за счет несимметрии конструкции, неточности изготовления и сборки полюсных наконечников и всего электромагнита в целом, неравномерности зазоров и, наконец, краевых эффектов при переходе магнитного поля через конструктивные зазоры, т. е. в основном за счет неодинакового сопротивления отдельных трубок поля. Временная несимметрия возникает за счет различной активной составляющей тока в отдельных замкнутых трубках магнитного поля. Это различие в активном токе вызывается неравномерным распределением потока по пакетам ярма, перехода магнитного потока из пакета в пакет поперек листов стали, разного наклепа стали в процессе ее обработки и др.

Поэтому в целях получения наибольшей однородности магнитного поля необходимо стремиться к созданию симметричной конструкции электромагнита, с одной стороны, и применить какие-нибудь компенсационные устройства для выравнивания временной неоднородности магнитного поля в зазоре, с другой стороны.

О принципах конструирования симметричных электромагнитов и компенсационных устройств будет сказано далее.

В бетатронах конструкции Московского трансформаторного завода применяются следующие соотношения размеров:

$$\frac{b}{r_0} = 0,4 \div 0,7 \quad \text{и} \quad \frac{h_3}{r_0} = 0,2 \div 0,4,$$

где  $b$  — ширина кольцевого зазора,

$h_3$  — высота кольцевого зазора на равновесной орбите.

При этом  $\gamma_{max}$  колеблется до 1 минуты, а  $h_{cmax}$  до 0,01 Н.

В радиальном направлении, как указывалось выше, напряженность магнитного поля должна спадать по закону, выраженному уравнением (3). Но в радиальном направлении имеет место также временной сдвиг между напряженностями поля в точках вдоль радиуса. Это имеет место из-за различных составляющих активного тока для отдельных [параллельных трубок, взятых вдоль радиуса на одном каком-либо азимуте.

Допуск на радиальную временную неоднородность колеблется до 1' без существенного сужения рабочей области магнита.

## Принципы конструирования электромагнитов

В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к электромагниту бетатрона, выработан ряд принципов, положенных в основу конструирования электромагнитов бетатронов.

### а) Форма полюсных наконечников

Прежде всего следует выбрать форму полюсных наконечников. Поскольку напряженность магнитного поля вдоль радиуса должна спадать в направлении увеличения радиуса по закону уравнения (3), то, пренебрегая падением магнитного потенциала в стали, можно грубо принять, что

$$h_{zx} \approx C r_x^n, \quad (10)$$

где  $h_{zx}$  - высота воздушного зазора на радиусе-векторе  $r_x$ ,  
 $C$  - постоянная.

Полюсный наконечник представляет собой коническую поверхность (рис. 1). Зубец, применяемый на краю полюсного наконечника, предназначен для уменьшения влияния распора магнитного поля от оси полюсов к периферии.

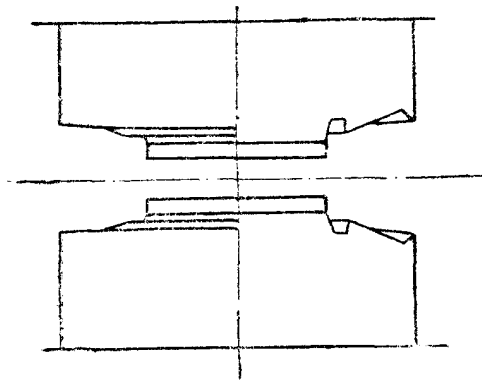


Рис. 1

Размеры центральной цилиндрической части магнита выбираются так, чтобы было удовлетворено уравнение (2), эта часть может быть выполнена съемной, в виде вкладыша или как продолжение полюса. Если эта часть является съемной, то ее можно использовать для подгонки равновесной орбиты при изготовлении бетатрона. Для этого она заведомо делается несколько большей по высоте, затем подшлифовывается до необходимого размера по данным испытания.

Расчет уменьшения высоты вкладышей производится, исходя из того, что изменение центрального потока через вкладыш, в зависимости от необходимого по испытанию смещения радиуса равновесной орбиты  $\Delta r$ , определяется следующей формулой:

$$\Delta \Phi = 2 \pi r \cdot \Delta r \cdot H (1 - n).$$

Зная величину  $\Delta \Phi$ , можно определить изменение зазора между вкладышами, а следовательно, и изменение высоты вкладыша.

Если центральная цилиндрическая часть является непосредственным продолжением полюса, то подгонка равновесной орбиты производится изменением зазоров в магните (главного и вспомогательных), чем меняется соотношение между средней напряженностью магнитного поля внутри орбиты и напряженностью на орбите.

Поскольку электромагнит питается переменным током и полюс вследствие этого должен быть собран из радиальных листов трансформаторной стали (во избежание сильного перегрева стали), конструктивно полюсный наконечник изготавливается не отдельно, а представляет собой одно целое с полюсом. На МТЗ каждый листок трансформаторной стали полюса штампуются уже с заданной формой полюсного наконечника (рис. 4в и 6б).

Как показали исследования, наличие вкладышей нарушает закон спада-ния магнитного поля в воздушном зазоре вблизи вкладышей, если высота последнего рассчитана по уравнению (10). В области, ближайшей к вкладышам, величина  $n$  становится больше 1, и в связи с этим теряется часть так называемой „рабочей“ области бетатрона. Для компенсации влияния цилиндрической центральной части в полюсе делается небольшая впадина (рис. 1). Размеры впадины трудно поддаются расчету и обычно подбираются экспериментально. Это впадина, как мы увидим ниже, используется для размещения в ней специальной обмотки.

#### б) Регулировка положения равновесной орбиты в процессе работы бетатрона

На оптимальную интенсивность гамма-излучения бетатрона влияет положение равновесной орбиты по отношению к инжектору. Поэтому, нам кажется, что большее значение для получения большей интенсивности будет иметь „подрегулировка“ радиуса равновесной орбиты во время работы бетатрона. Для этого может быть использована обмотка, расположенная во впадинах полюса. Включая эту обмотку на регулируемое напряжение от источника, питающего главную обмотку электромагнита, можно менять величину потока внутри орбиты, а следовательно, и ее радиус. Эту же обмотку можно одновременно использовать и для „контракторной“ схемы, позволяющей сужать орбиту во время инжекции и для „экстракторной“ схемы, позволяющей расширять или сужать орбиту в конце ускорения, для вывода ускоренных электронов на внешнюю или внутреннюю мишень. Принципиальная схема одновременного использования одной и той же обмотки для целей питания 50-периодным и импульсным током представлена на рис. 2.

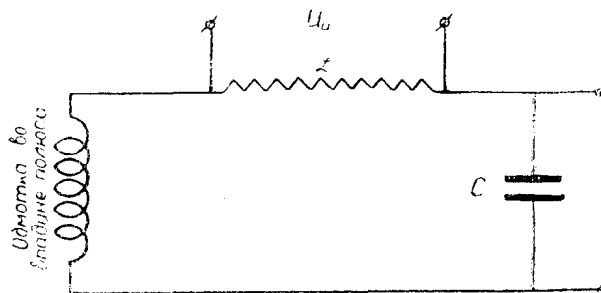


Рис. 2

Принцип работы этой схемы заключается в следующем.

При питании 50-периодным напряжением электрическое сопротивление индуктивности  $L$  невелико и, таким образом, оно как бы „закорачивает“ импульсный генератор  $U_{и}$ . Электрическое сопротивление емкости  $C$  велико и потребляемый ею ток 50 герц невелик и поэтому практически не является сколько-нибудь существенной нагрузкой для генератора  $U_{50}$ .

Когда в нужный момент подключается импульсный генератор  $U_{и}$ , то для него, наоборот, индуктивность  $L$  представляет большое электрическое сопротивление, а емкость  $C$  — малое. В связи с этим отпадает опасение за изоляцию генератора 50 герц.

Работа этой схемы была проверена и получены положительные результаты.

#### в) Вывод пучка ускоренных электронов на мишень

Вывод пучка ускоренных электронов на мишень может быть произведен двумя способами: при помощи „экстракторной“ схемы и при помощи насыщающихся вкладышей.

Работа „экстракторной“ схемы состоит в том, что в конце ускорения в необходимый момент в специальную обмотку подается импульс тока для, тельностью в несколько десятков микросекунд. В зависимости от знака, подведенного к обмотке импульса тока, поток внутри орбиты будет либо усиливаться или ослабляться, а, следовательно, радиус орбиты будет либо увеличиваться (смещение электронов на внешнюю мишень, обычно размещенной на тыльной стороне инжектора), либо уменьшаться (смещение электронов на внутреннюю мишень). Достоинство „экстракторной“ схемы заключается в том, что, во-первых, импульс тока может быть подан в любой момент времени ускорения и, следовательно, можно очень легко менять энергию ускоренных электронов, и, во-вторых, смещение ускоренных электронов может быть проведено на внешнюю мишень, могущую быть расположенной ближе к облучаемому объекту и получить этим самую большую интенсивность облучения объекта, так как интенсивность облучения, как известно, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния объекта от мишени.

Смещение ускоренных электронов при помощи насыщающихся вкладывшей основано на том принципе, что в конце ускорения, когда напряженность магнитного поля подходит к своей амплитуде, центральная цилиндрическая часть магнита начинает насыщаться. Рост центрального магнитного потока начинает уменьшаться и радиус орбиты обращения электронов начинает также уменьшаться, пока электроны не достигнут внутренней мишени.

Достоинство данного способа смещения заключается в том, что нет необходимости применять специальные обмотки, и, главным образом, специальный импульсный генератор. Однако крупным недостатком этого способа является отсутствие возможности регулирования энергии гамма-излучения установки и смещения электронов на внешнюю мишень.

#### г) Компенсация неоднородности магнитного поля

Как указывалось выше, неоднородность магнитного поля наиболее резко сказывается во время инжекции электронов в камеру. При этом наибольшее значение имеет временная неоднородность магнитного поля. Поэтому основное внимание должно быть уделено компенсации временной неоднородности. Так как источником появления временной неоднородности является различная активная составляющая тока в отдельных трубках поля, то, очевидно, поле следует разбить на отдельные участки (трубки) и охватить их обмотками, питаемыми активным (сдвинутым на  $90^\circ$  по отношению к основному току) током. Разделение электромагнита на участки видно на рис. 3б, 4б и 5б.

Как вытекает из уравнения (6), нет необходимости компенсировать активную составляющую тока в каждом участке. Достаточно лишь свести к допустимой величине эквивалентную неоднородность по уравнению (6). Для этого после разложения кривой „естественного“ распределения напряженностей магнитного поля по окружности в гармонический ряд определяют те участки, где компенсация дает наибольший эффект. Питание обмоток активным током производится от того же источника тока, от которого питаются главные обмотки (или при помощи трансформации этого источника тока) через сравнительно большое сопротивление. Принципиальная схема питания представлена на рис. 7.

Если специальных обмоток для компенсации в электромагните не предусмотрено, то компенсацию можно провести со стороны ярма или колонны, охватывая витками ту или иную часть ярма, колонны. При двухъярменной конструкции электромагнита этот способ менее эффективен, поскольку компенсирующий поток полюса „расплывается“ на довольно большой угол и не создает „острой“ компенсации.

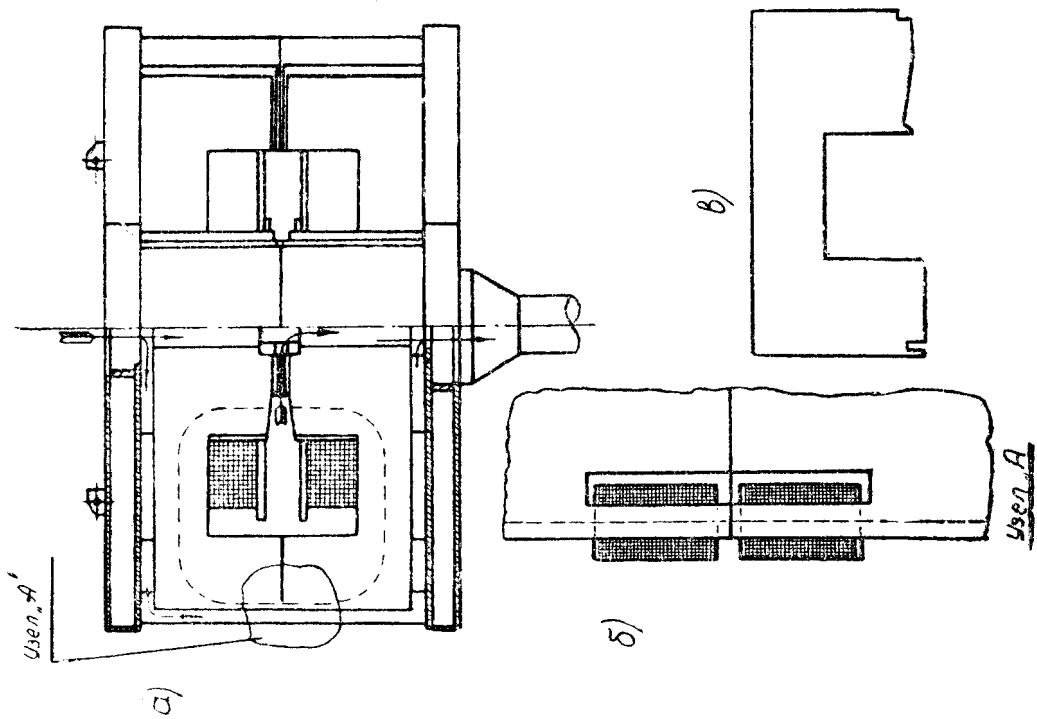


Рис. 4

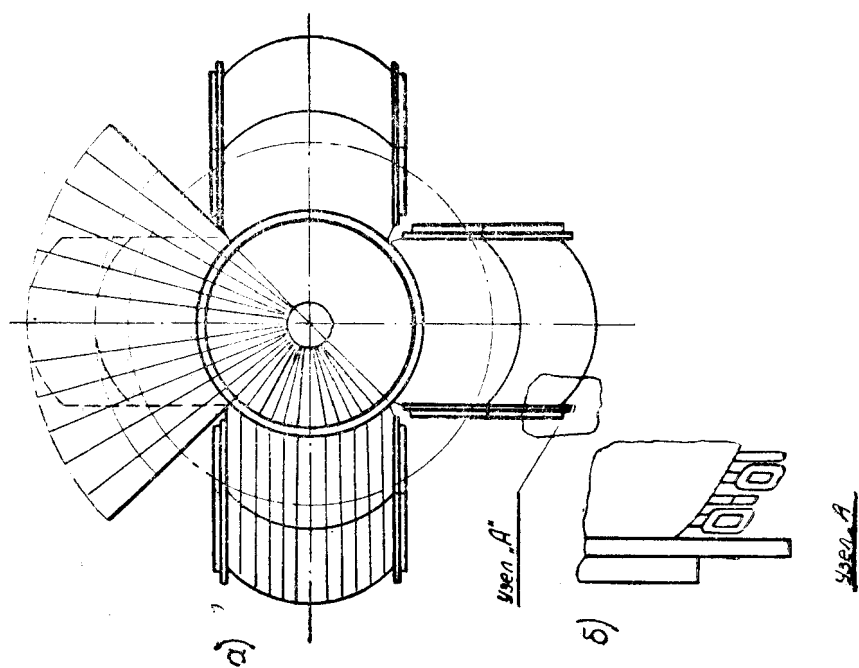


Рис. 3

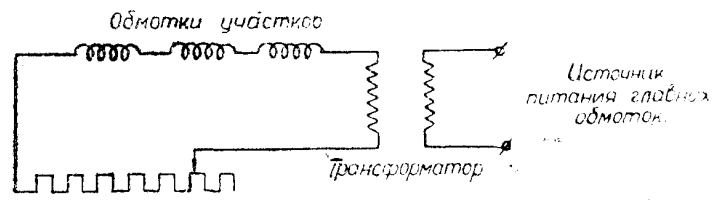


Рис. 7.

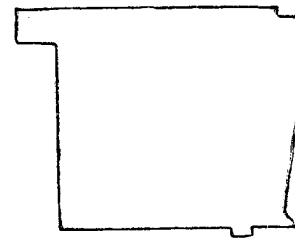
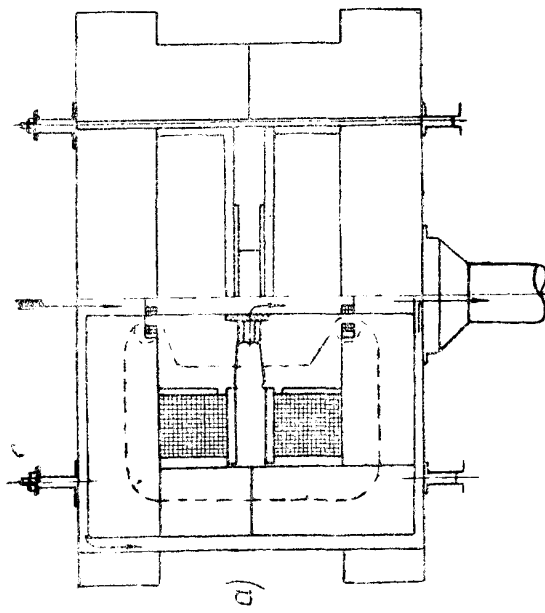


Рис. 6

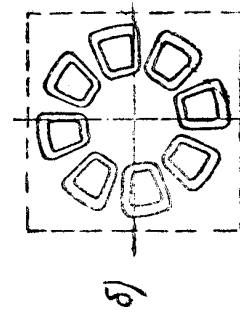
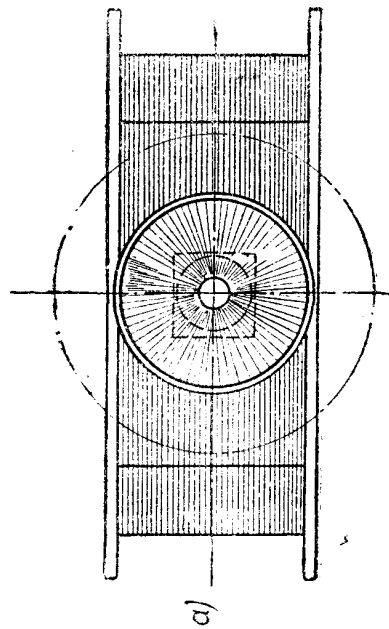


Рис. 5



#### д) Принципиальные конструкции электромагнитов

На рис. 3 и 4 приведена четырехъяремная, а на рис. 5 и 6 двухъяремная конструкции электромагнита. Как видно, четырехъяремная конструкция представляет собой симметричную систему. Все параллельные участки поля имеют одинаковые геометрические размеры. В связи с этим все участки должны иметь одинаковое магнитное сопротивление. Исключением из этого являются крайние участки, прилегающие к краям колонн. Из-за перехода магнитного потока поперек листов магнитопровода насыщение этих пакетов отличается от насыщения в других участках и, следовательно, имеют другое магнитное сопротивление, что вызывает некоторую неоднородность магнитного поля. Кроме того, изгиб листов в этой конструкции создает наклеп стали, что вызывает дополнительные потери и, следовательно, увеличение активной составляющей тока в данных участках. Тем не менее, неоднородность магнитного поля в четырехъяремной конструкции значительно меньше, чем в двухъяремной, так как в последней неоднородность магнитного поля вызывается несимметричностью конструкции.

Таким образом, неоднородность магнитного поля заложена в самой конструкции двухъяремного электромагнита. Если учесть еще и то, что неоднородность поля усугубляется из-за технологических и сборочных допусков, то вполне очевидно, что двухъяремная конструкция дает значительно большую неоднородность поля, чем четырехъяремная и требует большей настройки и компенсации.

Достоинством четырехъяремной конструкции МТЗ является также и то, что полюс электромагнита представляет собой одно целое с ярмом и колонной, так что полюс не требует дополнительного крепления.

Недостатком четырехъяремной конструкции является то, что она требует для изготовления больших размеров трансформаторной стали, так как из листа выкраивается сразу полюс, ярмо и колонна. Применение холоднокатаной стали для такой конструкции затруднено, так как холоднокатаная сталь имеет разное магнитное сопротивление вдоль и поперек проката, более чувствительна к наклепу и другим напряжениям в стали. Так как размеры листов холоднокатаной стали в настоящее время малы, последние конструкции электромагнитов разработаны МТЗ из холоднокатаной стали и в двухъяремном исполнении.

#### е) Охлаждение электромагнитов

Лишь самые малые бетатронные установки, питаемые переменным током с частотой 50 *герц*, могут быть выполнены с естественным воздушным охлаждением. Более мощные установки, начиная с энергии 25 *Мэв* и выше при питании их переменным током с частотой выше 50 *герц*, должны иметь принудительное охлаждение. Как правило, применяется охлаждение с принудительной циркуляцией воздуха. Учитывая, что в процессе эксплуатации бетатрона приходится снимать верхнюю его половину, соединение вентилятора с электромагнитом производится снизу, на неподвижной половине. В целях обезвреживания воздуха в помещении бетатрона радиоактивный воздух из бетатрона должен быть изъят, поэтому вентилятор работает на отсос воздуха, как это показано на рис. 4а и 6а.

Сечения каналов рассчитаны так, чтобы скорости воздуха были порядка 10–15 *м/сек*. После сборки магнита сечения каналов могут быть дросселированы для получения расчетных скоростей воздуха. Мощности моторов вентиляторов составляли 3–5 *квт*. Вентиляторы среднего давления 200 *мм* водяного столба, производительностью 3000–5000 *м<sup>3</sup>/час*.

## Схема питания электромагнитов

Бетатронные установки потребляют большую реактивную мощность. Для того, чтобы освободить питающую сеть от несения нагрузки большой реактивной мощности, к обмотке электромагнита подключается батарея статических конденсаторов. Емкость конденсаторных батарей настраивается близко к резонансу с индуктивностью электромагнита так, что сеть несет в основном небольшую активную нагрузку.

Чтобы избежать толчков при включении в сеть, как правило, в схему питания включается регулятор, позволяющий повышать напряжения постепенно с низкой величины или с нуля.

Для намагничивания электромагнита применяется обмотка, число витков которой выбирается так, чтобы наиболее полно использовать по напряжению имеющиеся в распоряжении конденсаторные банки.

В случае, если напряжение намагничивающей обмотки электромагнита намного отличается от напряжения сети, то применяется добавочно обмотка, называемая обмоткой питания. Число витков этой обмотки выбирается по напряжению питания, а ток—в соответствии с активным током, потребляемым схемой питания (принимая для запаса коэффициент мощности 0,5).

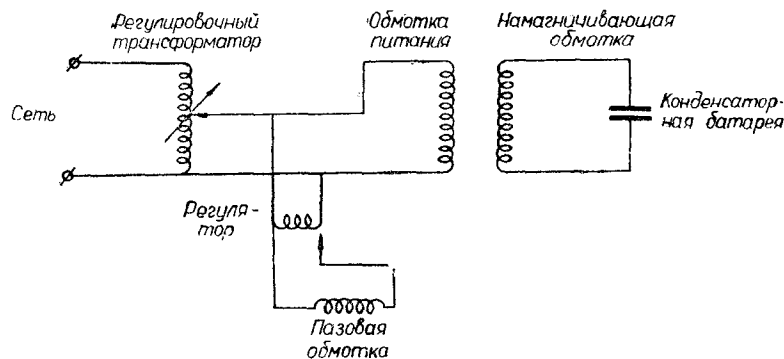


Рис. 8

Питание электромагнита переменным током с частотой 50 *герц* может быть осуществлено непосредственно от сети (рис. 8). Желательно, чтобы для питания бетатронной установки был выделен отдельный фидер во избежание большого колебания напряжения во время работы.

По состоянию сетей в промышленных районах можно ожидать, что частота и величина напряжения в них более или менее стабильны, так что нет необходимости вводить в схему устройство по стабилизации напряжения и частоты. В крайнем случае можно применить автоматическую стабилизацию напряжения, разработанную МТЗ.

При применении переменного тока для питания обмоток частотой выше 50 *герц* (150, 200, 300, 500) можно применить либо четырехмашинный агрегат, либо ламповый генератор.

Четырехмашинный агрегат состоит из асинхронного двигателя, питающегося от сети частотой 50 *герц*. На одном валу с этим двигателем находится генератор постоянного тока. Генератор постоянного тока питает двигатель постоянного тока на одном валу, с которым находится синхронный генератор, питающий обмотку электромагнита.

Наличие промежуточного звена на постоянном токе позволяет легко регулировать частоту синхронного генератора и осуществить стабилизацию частоты, а если нужно и напряжения.

Можно применить также схему статического утроителя частоты. Эта схема, однако, еще требует доработки в части большей стабилизации напряжения.