

## К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ СИНХРОТРОНОВ НА СРЕДНИЕ ЭНЕРГИИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ УСКОРЕНИЕМ

Г. И. ДИМОВ и В. А. КОЧЕГУРОВ

(Представлено проф. д-р. физ. - мат. наук А. А. Воробьевым)

Большинство сооруженных синхротронов на энергию 300–400 Мэв имеет центральный насыщающийся сердечник, с помощью которого осуществляется предварительное индукционное ускорение. При этом основной магнитопровод имеет С-образное сечение зазором к центру с разрезом в средней плоскости (рис. 1). Верхняя половина магнитопровода скреп-

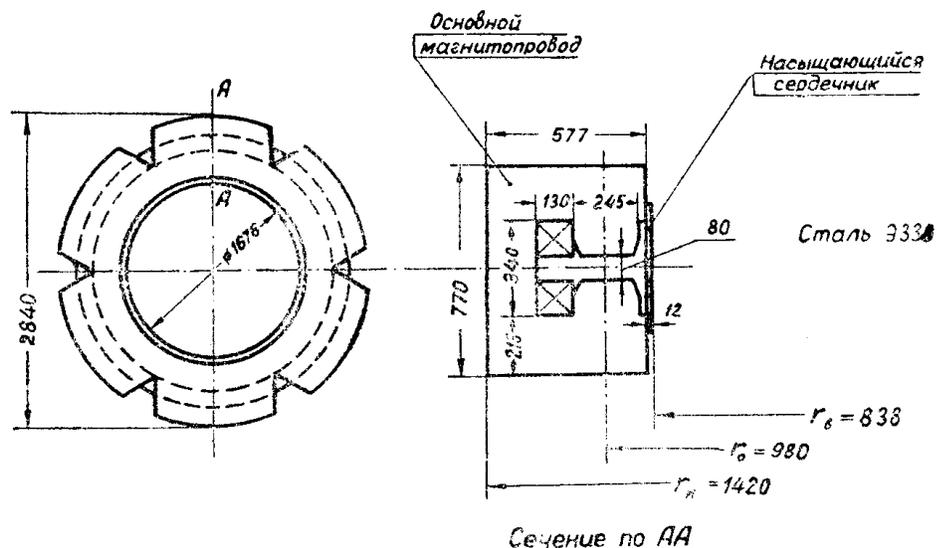


Рис. 1. Электромагнит синхротрона на 400 Мэв с насыщающимся сердечником.

ляется в одно целое и является подъемной. Данная конструкция синхротрона имеет одно большое достоинство—это простота и надежность осуществления предварительного ускорения. Однако у этой конструкции имеются существенные недостатки:

1. Очень плохой доступ к междуполюсному пространству.
2. Обязательное наличие разреза основного магнитопровода; при наличии разреза значительно увеличиваются неоднородности магнитного поля, связанные с вихревыми токами.

3. Повышенные горизонтальные габариты электромагнита по сравнению с электромагнитом без индукционного предварительного ускорения (с С-образным сечением магнитопровода зазором наружу).

Для синхротрона на 400 Мэв наружный диаметр возрастает с 2,45 до 2,85 м, т. е. на 16%.

Нами предлагается несколько вариантов конструкций синхротронов с предварительным индукционным ускорением, но с ненасыщающимся дополнительным сердечником и с дополнительной схемой возбуждения этого сердечника.

Первый вариант (рис. 2).

Магнитопровод имеет несимметричное Ш-образное сечение с разрезом в средней плоскости. Сечение наружной стойки меньше сечения внутренней стойки. Основная обмотка возбуждения электромагнита кольцевая. Возбуждаемый в полюсах этой обмоткой магнитный поток разветвляется и замыкается через внутреннюю и наружную стойки магнитопровода.

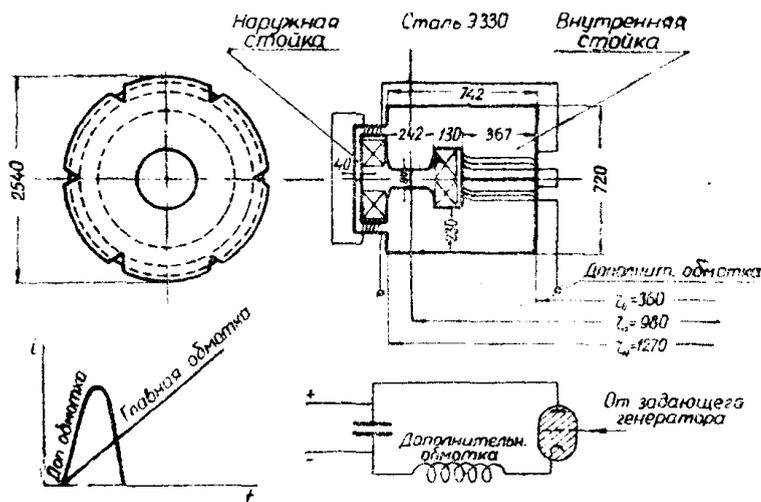


Рис. 2. Электромагнит синхротрона на 400 Мэв с несимметричным Ш-образным сечением.

Дополнительным сердечником, благодаря которому возможно осуществление предварительного индукционного ускорения, здесь служит наружная стойка магнитопровода. В период индукционного ускорения магнитные потоки в полюсах и во внутренней стойке проходят в одном и том же направлении и замыкаются через наружную стойку. Магнитный поток во внутренней стойке (центральный ускоряющий поток) согласован по скорости роста с магнитным полем на орбите. Указанное распределение магнитного потока в период индукционного ускорения достигается возбуждением дополнительного магнитного потока, который складывается с основным магнитным потоком.

Дополнительный магнитный поток циркулирует по замкнутому контуру; во внутренней стойке его направление совпадает с направлением основного магнитного потока в полюсах, а в наружной стойке он проходит в обратном направлении. Дополнительный магнитный поток не ответвляется в полюса. Этот поток возбуждается дополнительной обмоткой, состоящей из двух последовательно соединенных частей—внутренней и наружной (рис. 2). Поскольку магнитный поток, возбуждаемый дополнительной обмоткой, не сцеплен с основной обмоткой, т. е. взаимдуктивность между основной и дополнительной обмотками отсутствует, электрические цепи основной и дополнительной обмоток являются независимыми. Условием независимости основной и дополнительной обмоток опреде-

ляется соотношение чисел витков внутренней и наружной частей дополнительной обмотки. Отношение внутренних ампервитков к наружным равняется отношению магнитного сопротивления внутренней ветви магнитопровода к магнитному сопротивлению наружной ветви. Поскольку магнитные сопротивления магнитопровода непостоянны и соотношение витков в дополнительной обмотке на практике может несколько отличаться от соотношения магнитных сопротивлений, то некоторая слабая взаимоиндуктивность будет существовать между основной и дополнительной обмотками. Однако практически небольшая взаимосвязь между ними вполне допускается.

Абсолютное значение ампервитков дополнительной обмотки в период индукционного ускорения должно изменяться со скоростью, пропорциональной скорости роста магнитного поля на орбите. Коэффициент пропорциональности определяется бетатронным соотношением.

Дополнительная обмотка питается короткими импульсами тока, крутизна фронта которых соответствует скорости роста магнитного поля на орбите на протяжении всего предварительного индукционного ускорения. Простейшая схема питания дополнительной обмотки приведена на рис. 2.

Предварительно заряженный конденсатор в соответствующий момент разряжается через тиратрон или игнитрон на дополнительную обмотку, при этом в обмотке возникает полусинусоидальный импульс тока. Магнитное поле на орбите во время индукционного ускорения изменяется практически по линейному закону. Для индукционного ускорения будет пригодна только практически линейная часть фронта полусинусоидального импульса: для синхротрона на  $300 \div 400$  Мэв с радиусом орбиты около 1 м можно использовать примерно  $15^\circ$  полусинусоидального импульса. При этом к концу индукционного ускорения радиус бетатронной орбиты сократится на  $1\%$ .

Можно питать дополнительную обмотку пилообразными импульсами тока, при этом мощность схемы ее питания уменьшится в 16 раз по сравнению со схемой рис. 2. Однако такая схема будет более сложной.

Минимальный радиальный размер наружной стойки определяется энергией предварительного индукционного ускорения и формой импульса тока в бетатронной обмотке.

Электромагнит первого варианта по сравнению с электромагнитом с насыщающимся сердечником имеет следующие достоинства:

1. Более хороший доступ к междуполусному пространству благодаря тому, что радиальный размер наружных стоек значительно меньше. Для синхротрона на 400 Мэв этот размер составляет 4 см против 19 см.
2. Крепление магнитопровода более простое.
3. Уменьшенные габариты и вес электромагнита.

Выполняющая роль дополнительного сердечника наружная стойка не только не увеличивает сечения основной части магнитопровода, но даже позволяет уменьшить его, так как эта стойка при синхротронном ускорении служит обратным магнитопроводом для части основного магнитного потока. Поэтому применение предварительного индукционного ускорения в этом варианте не приводит к увеличению веса магнитопровода. Для синхротрона на 400 Мэв наружный диаметр электромагнита составляет 2,54 м против 2,85 м; вес магнитопровода составляет 14,8 т против 17,3 т, т. е. меньше на  $15\%$ .

Недостаток предлагаемого варианта электромагнита заключается в наличии специальной дополнительной схемы питания дополнительной обмотки. Однако эта схема имеет небольшую мощность по сравнению со схемой питания основной обмотки. Для синхротрона на 400 Мэв при предварительном индукционном ускорении до 5 Мэв реактивная энергия, потребляемая дополнительной обмоткой, составляет 1,42 кдж против 104 кдж,



трона. На рис. 4 приводим две возможные схемы питания электромагнита в период предварительного индукционного ускорения. В этих схемах развязка цепей по импульсным напряжениям осуществляется с помощью вентилялей.

При работе синхротрона с первой схемой (рис. 4) его полюса подмагничиваются постоянным током, так что создается положительная статическая составляющая управляющего поля. Значение этой составляющей поля

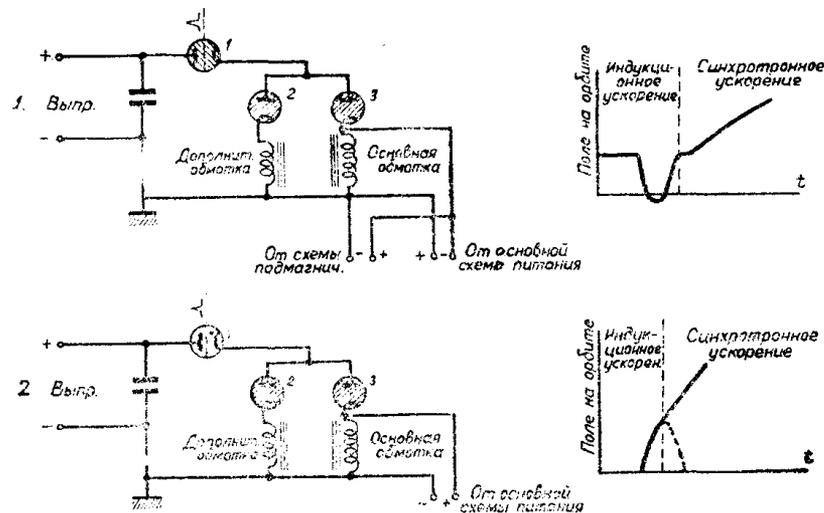


Рис. 4. дополнительные схемы питания электромагнита с ненасыщающимся дополнительным сердечником.

на орбите соответствует энергии предварительного индукционного ускорения. Схема возбуждает отрицательный импульс магнитного поля полусинусоидальной формы. Индукционное ускорение осуществляется на заднем фронте этого импульса. После окончания индукционного ускорения электроны обращаются в постоянном магнитном поле. Далее основная обмотка включается на основную схему питания и происходит синхротронное ускорение. Управляемый вентиль 1 служит для коммутации тока, вентили 2 и 3 служат для развязки цепей по импульсным напряжениям.

Вторая схема (рис. 4) отличается от первой отсутствием подмагничивания и обратной полярностью дополнительной схемы питания. Эта схема возбуждает положительный полусинусоидальный импульс магнитного поля. Индукционное ускорение совершается на переднем фронте этого импульса. Амплитуда импульса определяется энергией предварительного ускорения. Синхротронное ускорение начинается у „вершин“ этого импульса.

В рассматриваемом варианте общее сечение приставных сердечников определяется только энергией предварительного индукционного ускорения.

Достоинства второго варианта электромагнита по сравнению с первым вариантом:

1. Хороший доступ к междуполусному пространству. Приставные сердечники в практических случаях занимают небольшую долю наружной окружности электромагнита. Это объясняется тем, что второй вариант эквивалентен первому варианту, если в последнем дополнительный магнитный поток возбуждается не полусинусоидальными, а пилообразными импульсами тока. Сечение приставных сердечников во втором варианте в 4 раза меньше минимального сечения наружной стойки в первом варианте. Для синхротрона на 400 Мэв с предварительным индукционным ускорением до 5 Мэв приставные сердечники по весу составляют 9,5% от

веса магнитопровода (1,63 т); при радиальном размере 5 см все сердечники занимают 23% наружной окружности.

2. Отсутствие разреза сечения в основном магнитопроводе.

3. Понижение мощности дополнительной схемы питания в 16 раз.

Третий вариант (рис. 5).

Электромагнит имеет прямолинейные участки. Сечение магнитопровода С-образное с зазором наружу.

Индукционное ускорение производится с помощью дополнительного замкнутого сердечника, располагаемого на одном из прямолинейных участков. Сердечник охватывает ускорительную камеру и на период индук-

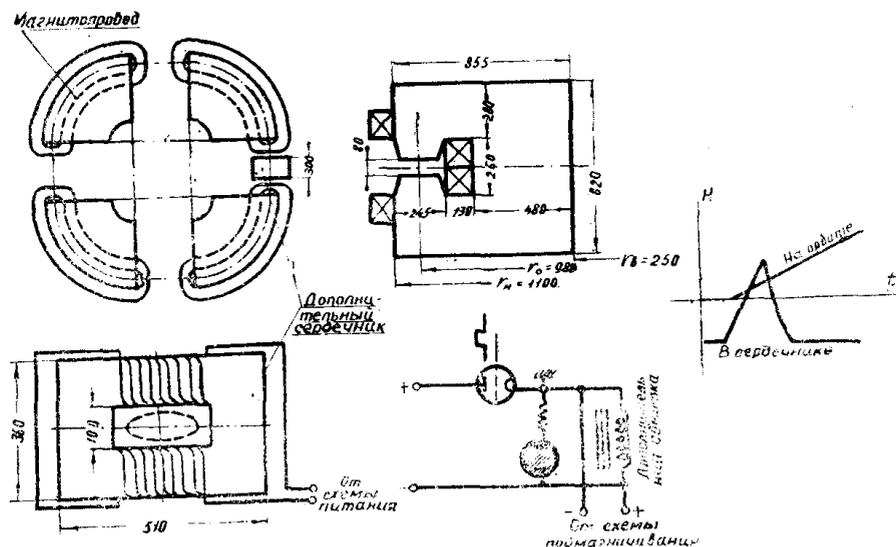


Рис. 5. Электромагнит синхротрона на 400 Мэв с индукционным ускорительным промежутком.

ционного ускорения возбуждается импульсом тока треугольной формы. Крутизна фронта импульса определяется скоростью роста магнитного поля на орбите и бетатронным соотношением. Амплитуда импульса тока определяется энергией индукционного ускорения.

Габариты и вес замкнутого сердечника определяются энергией индукционного ускорения и получаются сравнительно небольшими. Для синхротрона на 400 Мэв при индукционном ускорении до 5 Мэв вес замкнутого сердечника составляет 0,31 т или 1,8% от веса магнитопровода; реактивная энергия, требуемая для возбуждения сердечника, составляет около 30 дж.

На рис. 5 приводится возможная схема питания дополнительного замкнутого сердечника. Основной особенностью этой схемы является наличие модуляторной лампы. Применяется подмагничивание сердечника постоянным током. Достоинства первого и второго вариантов электромагнита здесь усилены.

Все приведенные варианты электромагнита просчитаны. Приведенные дополнительные схемы питания электромагнита могут быть выполнены на тиратронах, игнитронах, газотронах и модуляторных лампах отечественного производства.

Нами приведены основные варианты синхротрона с предварительным индукционным ускорением без насыщающегося сердечника, возможны еще и другие варианты.