

О ПРИМЕНЕНИИ БЕТАТРОНА В КАЧЕСТВЕ ИНЖЕКТОРА ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОНАХ НА ВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ

А. А. ВОРОБЬЕВ, Г. И. ДИМОВ

При выборе типа инжектора для электронных синхротронов в основном учитывают:

- 1) количество электронов, которое может быть введено в синхротрон в каждом цикле ускорения;
- 2) значение энергии инжекции, которое рационально принять для того или иного типа инжектора.

Необходимо стремиться к большим количествам электронов, вводимых в синхротрон. В действующих в настоящее время синхротронах получают после каждого цикла ускорения $10^8 \div 10^{10}$ электронов.

Повышение энергии инжекции дает известные преимущества по основному узлу синхротронов—электромагниту. Повышение энергии инжекции сопровождается значительным сокращением веса и габаритов электромагнита и мощности его питания. При достаточно высоком значении инжекции отпадает необходимость в предварительном индукционном или синхрофазотронном ускорении электронов в камере синхротрона.

При оценке того или иного типа вспомогательного ускорителя, применяемого в качестве инжектора синхротрона, следует принимать во внимание не средний ток ускоряемых в этом ускорителе электронов, а количество электронов, которое может быть введено от этого ускорителя в камеру синхротрона. В камеру синхротрона могут быть введены электроны с достаточно малым разбросом по энергии, с достаточно малой расходимостью по направлению скоростей и достаточно малым поперечным сечением пучка. Для синхротронов на $1 \div 2$ Бэв допустимый разброс энергии вводимых электронов составляет $1 \div 0,1$ %, допустимая входная расходимость пучка электронов— $10^{-2} \div 10^{-3}$ радиан, допустимое сечение электронного пучка 1 см^2 . Для синхротронов на более высокие энергии допуски на разброс энергии и расходимость пучка уменьшаются.

Ввод электронов в камеру синхротрона осуществляется в течение небольшого интервала—времени ввода. В синхротронах на энергию порядка $1 \div 2$ Бэв ввод электронов производится в течение нескольких оборотов и время ввода обратно пропорционально скорости роста магнитного поля, пропорционально энергии инжекции и обычно не превышает 5 мксек. В синхротронах на более высокие энергии свыше 6 Бэв ввод электронов осуществляется в течение 1 оборота, время ввода не превосходит 1 мксек.

Захватывается в ускорение в синхротроне только небольшая доля из введенных в камеру электронов. Обычно эта доля имеет величину порядка 0,1.

Наибольшими возможностями по обеспечению ввода большого количества электронов обладают высоковольтные ускорители с импульсным трансформатором (импульсный ток порядка 10 а) и генератором выпрямленного напряжения (импульсный ток $0,1\div 1\text{ а}$). Пучок электронов от этих ускорителей имеет небольшую расходимость и высокую „мгновенную“ моноэнергетичность. Однако энергия инжекции, которую могут обеспечить указанные ускорители, сравнительно небольшая. Практически можно соорудить импульсный трансформатор на напряжение $1\div 1,5\text{ Мв}$, а генератор выпрямленного напряжения на напряжение $2\div 3\text{ Мв}$. Инжекторы такого типа могут быть применены в синхротронах на энергию порядка $1\div 2\text{ Бэв}$ с предварительным ускорением в камере синхротрона.

Для синхротронов на энергии $1\div 2\text{ Бэв}$ инжектором может служить электронный циклотрон—микротрон. Микротрон позволяет получать ток электронов порядка 10 ма (в микротроне Шведского синхротрона на 1200 Мэв электронный ток составляют 20 ма). Разброс энергий электронов составляет $0,03\div 0,05\%$. Микротрон может обеспечить захват в синхротронное ускорение $10^{10}\div 10^{11}$ электронов. Практически разумно сооружение микротрона на энергию $4\div 8\text{ Мэв}$. Такая сравнительно высокая энергия инжекции позволяет обойтись без предварительного ускорения в камере синхротрона, при этом вес электромагнита и мощность его питания могут быть сравнительно небольшими.

Удовлетворительным типом инжектора является линейный ускоритель с бегущей волной. Линейный ускоритель позволяет инжектировать электроны с очень высокой энергией и может применяться в синхротронах на очень высокие энергии в 6 и более Бэв . Современные линейные ускорители позволяют получать импульсные токи около 100 ма . При этом пучок электронов имеет широкий энергетический спектр в $3\div 5\%$ от номинальной энергии. Поэтому может быть введена в синхротрон только примерно одна десятая доля электронов, т. е. полезный ток электронов от линейного ускорителя не превышает 10 ма . Линейный ускоритель обеспечивает захват в ускорение порядка 10^{10} электронов.

Следует отметить, что ток электронов, ускоряемых в линейном ускорителе, ограничивается мощностью высокочастотных генераторов.

В качестве инжектора электронов в синхротрон предлагается использовать индукционный ускоритель—бетатрон. Бетатрон является простой и небольшой ускорительной установкой по сравнению с другими типами инжекторов. Бетатрон, как и линейный ускоритель, позволяет инжектировать электроны с очень высокой энергией.

В современных бетатронах при энергии инжекции $30\div 40\text{ Кэв}$ с достаточно большим рабочим сечением камеры циркулирующий на орбите электронный ток достигает 1 а . При этом число электронов, ускоряемое за цикл, составляет 10^{11} .

В настоящее время осуществлен вывод электронов из камеры бетатрона. Так Гунд и Райх [1] осуществили вывод из бетатрона 70% электронов при энергии в 6 Мэв с помощью электростатического дефлектора. Фут и Петри [2] с помощью импульсного магнитного дефлектора вывели из бетатрона около 60% электронов при энергии 24 Мэв . Ими осуществлен вывод электронов также при энергиях до 50 Мэв . В Томском политехническом институте Б. А. Кононовым осуществлен вывод электронов с энергией 10 Мэв из бетатрона с помощью импульсного электрического дефлектора с эффективностью в 30% .

Для выведенного из бетатрона пучка электронов могут быть достигнуты небольшие расходимость и сечение. Фут и Петри получили выведенный пучок с расходимостью порядка $0,01$ радиана в воздухе сечением $3\times 5\text{ мм}^2$. Б. А. Кононовым получен пучок с расходимостью порядка $0,1$ радиана в воздухе сечением $6\times 10\text{ мм}^2$. В вакууме расходимость пучка уменьшается.

Пучок электронов с указанными характеристиками нетрудно сфокусировать в пучок с еще меньшей расходимостью с таким же поперечным сечением. Время вывода электронов из бетатрона может быть сделано менее 1 мксек. Фут и Петри осуществили вывод электронов примерно за 1 мксек.Mono-энергетичность электронов от бетатрона высокая, особенно при выводе электронов на „вершине“ импульса тока, питающего электромагнит бетатрона.

Таким образом, все выведенные из бетатрона электроны могут быть введены в камеру синхротрона. При ускорении в бетатроне за цикл 10^{12} электронов можно ускорять в синхротроне за цикл $10^9 \rightarrow 10^{10}$ электронов.

В бетатроне ускоряемое за цикл число электронов не ограничивается мощностью ускоряющей системы и определяется только условиями инжекции электронов в бетатрон. А условия инжекции электронов в бетатрон могут быть значительно улучшены. Уже в настоящее время инжекцией

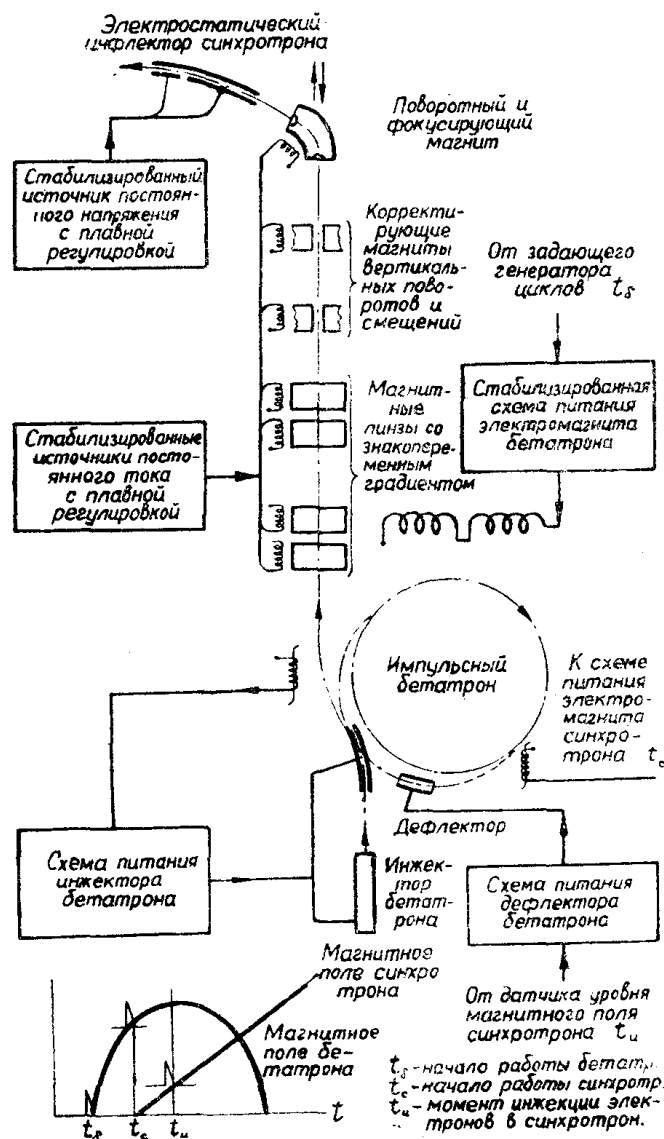


Рис. 1. Функциональная схема системы инжекции импульсного синхротрона.

электронов при постоянном управляющем магнитном поле (что осуществлено, например, Шиттенхельмом [3]) достигнуто увеличение циркулирующего

тока электронов в бетатроне до 10 а . Другим путем увеличения ускоряемого в бетатроне количества электронов является повышение энергии инъекции. Последнее может быть достигнуто применением в качестве инжектора бетатрона высоковольтной трубки с импульсным трансформатором.

На рис. 1 приводим возможную функциональную схему системы инъекции с бетатроном для случая импульсной работы синхротрона.

В схеме приводятся две фокусирующие линзы, которые позволяют даже при значительной расходимости электронов на выходе из бетатрона получить параллельный пучок с небольшим сечением. При незначительной расходимости электронного пучка бетатрона порядка $0,01$ радиана можно ограничиться одной линзой.

Магнитные линзы со знакопеременным градиентом и поворотный фокусирующий магнит с вращающимися вкладышами позволяют производить фокусировку электронного пучка отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Магнитные и электрические поля канала инъекции статические. Следить эти поля следящими за энергией инъекции представляет большие технические трудности.

Питание электромагнита бетатрона необходимо стабилизировать. Вывод электронов из бетатрона необходимо производить в окрестности „вершины“ импульса магнитного поля бетатрона. Так как в этой окрестности магнитное поле изменяется слабо, то можно допустить колебание момента вывода электронов относительно „вершины“ импульса в значительном интервале (порядка 10 мксек) без существенного колебания энергии инжектируемых электронов. Колебания момента вывода электронов возникают из-за нестабильности интервала времени $t_c - t_6$ (рис. 1) и нестабильности питания электромагнита синхротрона.

Стабильность питания инфлектора, поворотного и корректирующих магнитов определяется требуемой точностью направления ввода пучка электронов.

Стабильность питания магнитных линз определяется допустимой расходимостью электронного пучка при вводе.

Стабильность питания электромагнита бетатрона определяется требуемой стабильностью энергии инъекции и стабильностью поворотных магнитных и электрических полей канала инъекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gund K., Reich H., Zs. f. Phys., 126, 383, 1949
2. Foote R., Petrec B., Rev. Sci. Instr., 25, 694—698, 1954
3. Schittenhelm R., Arch. techn. Messen, № 236, 205—208, 1953.