

811 760 1318

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ  
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ԳՐԱԿԱՆ ԶԱՆՈՐՆՈՒՄ ՆԱՍԻՃԵ ՏՕՅԵՆԻԵ

ЕФИ—89(74)

*И.П.Карабеков, В.К.Кроль*

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ АВТОРЕГУЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССА ИМЖЕКЦИИ В ЭЛЕКТРОННЫХ  
СИНХРОТРОНАХ

ԱՐՄԸՍ

ԵՐԵՎԱՆ

1974



ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Научное сообщение ЕФИ-89(74)

И.П.КАРАБЕКОВ, Б.К.КРОЛЬ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ АВТОРЕГУЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИИ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИНХРОТРОНАХ

Ереван 1974

И.П.КАРАБЕКОВ, В.К.КРОЛЬ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ АВТОРЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА  
ИНЪЕКЦИИ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИНХРОТРОНАХ

Показано, что система авторегулирования процесса инъекиии и посадки частиц на орбиту без предварительной монохроматизации пучка является не детерминированной. На примере Ереванского синхротрона рассматриваются устройства системы ввода, позволяющие осуществить замкнутую схему авторегулирования по информации о пучке. Предлагается функциональная схема авторегулирования и формулируются основные технические требования к отдельным узлам синхротрона.

Ереванский физический институт  
Ереван 1974.

Scientific Report ЕФИ-89(74)

I.P.KARABEKOV, V.K.KROLL

THE PRINCIPLES OF DESIGNING AUTO-  
REGULATED CIRCUITS OF PARTICLES  
INJECTION <sup>SM</sup> SYNCHROTRON ACCELERATORS

It is shown, that the system for autoregulation process of injection of particles and the matching to the orbit is not workable, if the primary beam is not monocromatic. Devices of injection system, permitting to realize closed circuit automatic regulation on beam information are considered for the case of E.P.I. Electron Synchrotron. Functional circuit for autoregulation is proposed and the main technical requirements for different devices of system are formulated.

Yerevan Physics Institute

Yerevan, 1974

© Ереванский физический институт, 1974

Системы инъекции и посадки частиц на орбиту должны обеспечивать устойчивый захват в режим ускорения максимума инжектированного пучка. Однако эта задача одновременно связана и с точностью наладки параметров кольцевого ускорителя в период инъекции. Поэтому достигнутое значение захваченного тока частиц может оказаться существенно меньше, чем максимально возможное.

Поэтому основной задачей системы авторегулирования процесса инъекции и посадки частиц на орбиту является поддержание пространственных и энергетических параметров инжектируемого пучка около их заданных расчетных значений, являющихся начальными для настройки магнитной и ускоряющей систем кольцевой машины.

Трудность авторегулирования процесса инъекции заключается в неоднозначности получаемой информации о пучке для группы частиц, сосредоточенных вокруг максимума кривой энергетического распределения.

В качестве инжекторов современных синхротронов обычно используются линейные волноводные ускорители, энергетический спектр которых достаточно широк. Типичный спектр показан на рис. I в координатах  $\gamma / \gamma_{\text{мах.}}$  и  $E/E_0$ . Как видно из рисунка, кривая имеет резко выраженную асимметрию относительно максимума. Низкоэнерге -

тическая часть спектра может содержать значительную долю тока инжектора. Так, для инжектора Ереванского синхротрона, до реконструкции системы питания ускоряющих секций [1] были характерны следующие параметры: при  $E/E_0 = -10\%$ ,  $J/J_{max} \sim 10\%$ .

Рассмотрим процесс посадки частиц на орбиту. Предположим, что пучок идеально выставлен по оси электроннопровода, ось которого, в свою очередь, с достаточной точностью отъюстирована относительно кольцевого электромагнита. Кроме того, допустим, что и оптическая ось фокусирующей системы линз также совмещена с осью электроннопровода. Однако установка оси пучка на прямолинейном участке тракта ввода по идеальной расчетной траектории не обеспечивает совмещения центра тяжести частиц, сгруппированных в районе максимума кривой энергетического распределения, с точкой посадки на орбиту. В месте посадки частиц на орбиту, в точке  $\theta = 0$ , совпадающей с центром инфлекторных пластин, после прохождения пучком участка магнитного поля кольцевого ускорителя от выхода из дефлектора до точки посадки пучок окажется развернутым в медианной плоскости. Координата частиц, отсчитываемая от середины рабочей области вакуумной камеры будет определяться выражением

$$z_i = \Delta E_i / E_0 \cdot \psi(\theta), \quad (1)$$

где функция  $\psi(\theta)$  имеет размерность длины и определяется из выражения (см. например [2])

$$\psi(\theta) \approx |F_z(\theta)| \frac{\bar{p} \sqrt{v_z}}{(M v_z)^2}. \quad (2)$$

Центр тяжести пучка, измеренный в точке посадки частиц на орбиту, определяется центром тяжести криволинейной трапеции, ограничен -

ной с одной стороны осью абсцисс, а с другой - той частью функции  $J/J_{\max} = f(\Delta E/E_0)$ , которая принципиально может вписаться в горизонтальный размер вакуумной камеры в середине инфлекторных пластин. Аппроксимируем ветви кривой энергетического распределения двумя экспонентами с показателями  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , соответственно для низкоэнергетической и высокоэнергетической частей. Центр тяжести пучка  $z_0$ , в точке посадки частиц на орбиту с учетом (1) определяется формулой

$$z_0 = \frac{-A_0 \int_0^{A_0} z i e^{\alpha_1 \frac{z i}{\Psi_0}} dz i + \int_0^{A_0} z i e^{\alpha_2 \frac{z i}{\Psi_0}} dz i}{-A_0 \int_0^{A_0} e^{\alpha_1 \frac{z i}{\Psi_0}} dz i + \int_0^{A_0} e^{\alpha_2 \frac{z i}{\Psi_0}} dz i}, \quad (3)$$

где  $A_0$  - максимальная полуширина вакуумной камеры ускорителя,  $\Psi_0$  - значение функции  $\Psi(\theta)$  в точке  $\theta = 0$ . После интегрирования (3) получим

$$z_0 = \frac{\left(\frac{\Psi_0}{\alpha_1}\right)^2 \cdot \left[ e^{-\frac{\alpha_1 A_0}{\Psi_0}} \left( \frac{\alpha_1 A_0}{\Psi_0} + 1 \right) - 1 \right] + \left(\frac{\Psi_0}{\alpha_2}\right)^2 \cdot \left[ e^{\frac{\alpha_2 A_0}{\Psi_0}} \left( \frac{\alpha_2 A_0}{\Psi_0} - 1 \right) + 1 \right]}{\frac{\Psi_0}{\alpha_1} \left( 1 - e^{-\frac{\alpha_1 A_0}{\Psi_0}} \right) - \frac{\Psi_0}{\alpha_2} \left( 1 - e^{\frac{\alpha_2 A_0}{\Psi_0}} \right)} \quad (4).$$

Расчет величины  $z_0$  по (4) для параметров кривой энергетического распределения, приведенного на рис.1 ( $\alpha_1 = 30$ ,  $\alpha_2 = 122$ ), ( $\Psi_0 = 1,7 \cdot 10^3$  и  $A_0 = 60$  мм) показывает, что установка оси пучка на прямолинейном участке по оси электропровода приводит к смещению центра тяжести части пучка, которая должна быть захвачена в режим ускорения, от измеряемого датчиком центра тяжести всего инжектируемого пучка, на величину  $\sim 15$  мм. Но величина  $z_0$  в общем случае оказывается неопределенной, так как форма спектра, может меняться в широких пределах как в процессе работы инжектора, так и при настройках, необходимость которых возникает после оста-

1

новок ускорителя. Такая неопределенность приводит к тому, что подбор регулируемых параметров системы ввода по информации о положении пучка может не привести к получению максимального значения захваченного тока. Задача усложняется еще и тем, что при смещении оси пучка относительно оптических осей квадрупольных линз последнее оказывает смещающее действие, величина которого зависит от их оптической силы и величины смещения. Поэтому введение в линзы токов в ряде случаев не дает ожидаемого увеличения захвата частиц на этапе проведения первого оборота.

Таким образом, для создания системы авторегулирования процесса инжекции по информации о пучке необходимо установить монохроматор на участке между линейным ускорителем и системой транспортировки пучка и посадки его на орбиту, как показано на рис.2.

Здесь представлен тракт ввода с монохроматором и логика системы авторегулирования процесса посадки частиц на орбиту.

На выходе линейного ускорителя устанавливаются две пары корректоров  $K_{x1}$ ,  $K_{y1}$ ,  $K_{x2}$ ,  $K_{y2}$  для управления положением и углом наклона оси пучка по обеим степеням свободы. Эта операция выполняется по информации о положении центра тяжести пучка, измеренного непосредственно на выходе инжектора и на входе в монохроматор. Авторегулирование этого параметра (точности ввода пучка в монохроматор) осуществляется блоком I, который обрабатывает токи в корректорах до тех пор, пока величина смещения пучка в месте установки датчика  $D_2$ , ось которого с требуемой точностью совмещена с осью монохроматора, не окажется меньше установленного порога по обеим координатам. Эта операция производится после того, как система коррекции положения пучка инжектора установит в месте расположения

датчика  $D_1$  нулевые значения координат пучка  $X_0$  и  $Y_0$ . После этого блок готовности 2 выдает разрешение на блок I. Датчики, устанавливаемые на тракте ввода, работают в качестве нуль-индикатора, что позволяет получить высокую степень разрешения. Экспериментальное макетирование показало, что точность отработки положения центра тяжести при помощи нуль-индикаторных датчиков  $\sim \pm 50$  мкс при токах пучка 100 ма в импульсе [3]. Далее пучок вводится в монохроматор 3. Величина тока в магнитах монохроматора обрабатывается блоком 4 до тех пор, пока не достигается заданное максимальное отношение сигналов от датчиков интенсивности, расположенных на входе и выходе из монохроматора. В случае, если заданное отношение получается ниже допустимого установленного порога, то система подстройки линейного ускорителя получает команду от блока 4 на регулировку формы энергетического спектра. После такой предварительной отработки тока в монохроматоре он окончательно подбирается таким образом, чтобы ось выведенного из монохроматора пучка пересекала плоскость датчика положения пучка  $D_2$ , установленного на выходе монохроматора с нулевыми отклонениями. Следующим необходимым элементом тракта ввода является коллиматор К, установленный между монохроматором и фокусирующей системой. Роль коллиматора заключается в формировании оптимальных стандартных начальных параметров пространственного распределения частиц в инжектируемом пучке перед его фокусировкой. В этом случае токи в линзах  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  могут быть строго рассчитаны и заранее введены при настройке тракта инжекции. Размер отверстия коллиматора зависит от угловой расходимости пучка инжектора, расстояния между концом коллиматора и серединой фокусирующей линзовой системы, от апертуры магнитных линз и параметров акцептанса. На входе коллиматора устанавливает-

ся датчик  $D_4$ , измеряющий положение центра тяжести пучка и интенсивность. На выходе монохроматора устанавливаются еще два корректора  $K_{x3}$  и  $K_{y3}$ , для наведения оси пучка на отверстие коллиматора. Ток в корректоре обрабатывается блоком 5 предварительно по информации о положении пучка на входе в коллиматор и окончательно по датчику положения и интенсивности  $D_7$ , установленного на конце прямолинейной трассы ввода.

Таким образом, пучок будет доведен до дефлектора с заданным углом наклона к касательной равновесной орбиты в точке ввода и нулевыми смещениями относительно центра рабочей области поля дефлектора. Ток в основной обмотке дефлектора (ДДФЛ) создается тем же источником 6, который питает монохроматор. Таким образом, при изменениях средней энергии инжектируемого пучка поле дефлектора будет автоматически изменяться так, чтобы траектория пучка в дефлекторе оставалась неизменной. Разумно также и фокусирующую систему линз питать источником 7, управляемым блоком 4 обработки поля в монохроматоре. Тогда и оптическая сила линз не будет зависеть от уходов энергии. Для правильной посадки частиц на орбиту необходимо установить центр тяжести пучка в середине инфлекторных пластин с нулевыми координатами по обеим степеням свободы. Эта задача связана одновременно и с правильным согласованием значения управляющего поля при инжекции  $H_{инж}$  с энергией вводимого пучка  $E_0$ , так как пучок уже проходит часть магнитной системы, равной периоду градиента. Если в таймерном устройстве в качестве датчиков поля используются пермалоевые датчики, то момент инжекции устанавливается предварительно запиткой одной из обмоток подмагничивания датчика, частью тока источника питающего монохроматор [4]. Уже при этом пучок будет подходить к точке посадки с координатой, очень близ-

кой к центру вакуумной камеры, и это положение пучка не будет зависеть от уходов средней энергии инжектированного пучка. Однако, окончательно  $H_{инж.}$  подбирается (на этом этапе) по информации от датчиков, установленных на выходе из дефлектора и в месте посадки частиц на орбиту с помощью блока В, который также обрабатывает ток в дополнительной обмотке пермалоевого датчика до тех пор, пока показания датчика  $D_9$  не окажутся равными нулю. В качестве дополнительных мер линзы на тракте ввода могут быть снабжены датчиками пучка, электрическая ось которых с требуемой точностью совмещается предварительно с электрической осью линзовой системы [5]. Сами линзы устанавливаются на координатном механизме, который может управляться дистанционно, либо по местной информации о пучке, получаемой от датчиков  $D_5$  и  $D_7$ . Целью такого устройства является достижение строгого совмещения осей пучка и линз, для исключения возможных ошибок, связанных с возникновением в рабочем зазоре линз отклоняющего поля на "равновесной" траектории пучка.

Момент инжекции, конечно, должен быть окончательно подобран по параметрам циркулирующего пучка. Для этого достаточно однажды установить (по циркулирующему пучку) требуемое отношение между величинами токов, обработанных с помощью монохроматора и датчиков  $D_8$ ,  $D_9$ , введение которых обеспечивает хороший режим циркуляции.

Чувствительность магнитоиндукционных датчиков нуль-индикаторов равна  $\sim 300 \pm 500$  мкв/мм · ма [6]. При значении инжектируемого тока  $I_{инж} = 100$  ма введение предлагаемой системы авторегулирования на Ереванском синхротроне позволит обеспечить следующие точности установки параметров траектории пучка в точке посадки частиц на орбиту:  $\tau \approx \pm 0,1$  мм,  $\tau' \approx 3 \cdot 10^{-5}$  рад и согласование энергии инжектированных частиц со значением  $H_{инж}$  на орбите

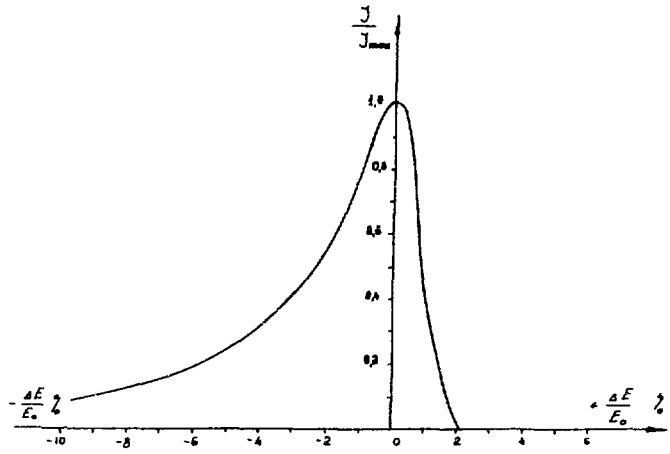


Рис.1 Спектр инжектора Ереванского синхротрона.

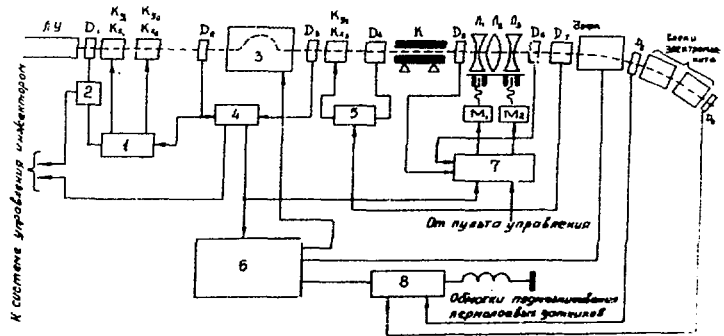


Рис.2 Тракт ввода и логика системы авторегулирования.

с точностью  $\sim 10^{-4} E_{\text{инж}}$ . Такая стабилизация параметров пучка на вводе обеспечивает наладку параметров магнитного поля на первых оборотах с точностью  $\sim 0,1 \pm 0,2\%$  [7,8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Г.Оксузян и др. Вопросы атомной науки и техники, серия „Физика высоких энергий“, вып. 4, стр.67, Харьков, (1973).
2. С.А.Хейфец. Электронный синхротрон, Ереван, (1963).
3. И.П.Карабеков и др. Труды III-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, стр.77, Москва (1973).
4. А.В.Бабаян и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, стр.36, Москва (1970).
5. В.К.Кроль и др. Тезисы докладов Всесоюзной конференции „Разработка и практическое применение электронных ускорителей“, стр. 127, Томск (1972).
6. Н.И.Мочешников. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, стр. 965, Атомиздат, Москва (1964).
7. И.П.Карабеков. Атомная энергия, 18, вып. I, стр.18 (1965).
8. И.П.Карабеков. Атомная энергия, 27, вып.5, стр.424 (1969).

Рукопись поступила 26 -го июля 1974 г.



Редактор Л.П.Мукаян

Заказ 0910

ВФ-03408

Тираж 300

Подписано к печати I/XI-74 г. Формат издания 30 x 40

0,8 уч.изд.л.ц.5 к.

Отпечатано на роталпринте  
Ереванского физического института, Ереван 36, пер. Маржаряна 2