

K-21



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 7938

КАРАБЕКОВ
Иван Патваканович

СИСТЕМЫ САМОБАЛАНСИРОВКИ
И КОРРЕКЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОННЫХ СИНХРОТРОНОВ НА ВЫСОКИЕ И
СВЕРХВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ

Специальность 05.14.11 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук Н.А.Моносзон,
доктор технических наук А.А.Васильев,
доктор технических наук Ю.Н.Денисов.

Ведущее предприятие: Московский инженерно-физический институт.

Автореферат разослан 1974 года.

Защита диссертации состоится 1974 года
в часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А.Батусов

9 - 7938

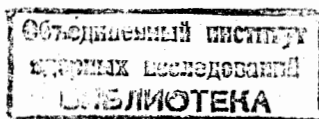
КАРАБЕКОВ
Иван Патваканович

СИСТЕМЫ САМОБАЛАНСИРОВКИ
И КОРРЕКЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОННЫХ СИНХРОТРОНОВ НА ВЫСОКИЕ И
СВЕРХВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ

Специальность 05.14.11 - электрофизические установки
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Диссертация посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям основных принципиальных проблем самобалансировки магнитных систем ускорителей, обладающих большой скоростью нарастания поля, а также решению некоторых задач коррекции в электронных синхротронах на высокие и сверхвысокие энергии. В работе уделено также большое внимание вопросам разработки датчиков основных параметров циркулирующего и внешних пучков, информация от которых позволяет осуществить основные корректирующие операции.

Принцип самобалансировки является развитием основных направлений, уже существующих в современной теории и технике ускорителей – кибернетизация с помощью ЭВМ; усовершенствование технологии изготовления и сборки электромагнита ускорителей и др. Основные принципы самобалансировки и другие вопросы, разработанные в диссертации, могут быть с успехом применены и в будущих ускорителях со сверхпроводящей магнитной системой.

Цели самобалансировки устраняют переменную составляющую возмущений управляющего магнитного поля и градиента этого поля. Этот тип возмущений является наиболее трудно компенсируемым по информации о пучке по той причине, что формы азимутального распределения ошибок переменной составляющей параметров поля меняются в течение цикла ускорения, так как зависят от мгновенного значения производной поля по времени, а также от распределения паразитных утечек в системе питания. Последние могут значительно изменяться в зависимости от общего технического состояния ускорителя, от тепловых, атмосферных и других условий.

Цели самобалансировки устраняют необходимость создания большого числа усилителей мощности, непосредственно создающих токи в корректирующих обмотках блоков. Такие устройства потре-

буются только для коррекции в начале цикла ускорения, когда абсолютные значения ошибок незначительны. Это позволит удешевить систему коррекции и повысить надежность и оперативность управления ими с помощью ЭВМ.

Самобалансировка позволяет значительно ослабить допуски на индивидуальные электрические и магнитные характеристики отдельных блоков и ослабить требования к степени однородности силы тока в цепях возбуждения электромагнита. Перечисленные свойства самобалансированного электромагнита позволяют ускорить процесс создания ускорителей, облегчить их запуск и обеспечить стабильную эксплуатацию.

Принцип самобалансировки заключается в создании в электромагните сильнофокусирующего ускорителя дополнительных пассивных цепей, с помощью которых переменная составляющая возмущения поля в отдельном блоке вызывает компенсирующее антивозмущение. Результаты теоретического и экспериментального исследований процесса самобалансировки приведены соответственно в первой и во второй главах диссертации.

Главной задачей теории самобалансирования является определение основного соотношения между произвольными отклонениями параметров блоков и свободно варьируемым параметром связи, осуществление которых для всех блоков электромагнита обеспечивает точное равенство абсолютных величин возмущений и возникающих антивозмущений. Для практической реализации принципа самобалансировки магнитные блоки снабжаются корректирующими обмотками, которые включаются параллельно с помощью согласующих элементов, выполненных конструктивно в виде автотрансформаторов, подключенных к части витков корректирующей обмотки.

Принципиальная схема самобалансирования приведена на рис. I.

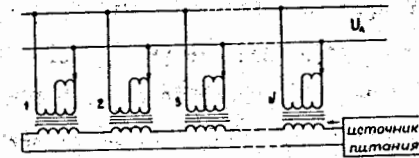


Рис. I. Принципиальная схема самобалансирования.

Исходным выражением для анализа процесса самобалансировки является уравнение магнитного потока в блоке, включенном в цепь самобалансировки:

$$\Phi_{Sn} = I_{1,1} \xi(n) R_{n1} + \frac{I_{1,1} (\chi_0 + \Delta \chi_{0n}) \left[\sum_{i=1}^{i=N} \xi(i) - \xi(n) \right] - I_{1,1} \xi(n) \chi_{1,n}}{\chi_{1,n} + \chi_{Sn} + \chi_0 + \Delta \chi_{0n} + \chi_{Bn}} R_{n2} \quad (I)$$

где $\xi(n) = I_{1,1} / I_{1,n}$; $I_{1,1}$ - сила тока в первичной обмотке блока, от которого начинается нумерация, Φ_{Sn} - магнитный поток, пересекающий строго заданную для всех блоков площадь S на медианной плоскости, $R_{n1} = \Phi_{Sn} / I_{1,n}$ - коэффициент пропорциональности между силой тока в основной обмотке и величиной магнитного потока, пересекающего заданную площадку S , $R_{n2} = \Phi_{Sn} / I_{n2}$ - коэффициент, определяющий ту же пропорциональность между потоком Φ_{Sn} и силой тока в корректирующей обмотке блока, $\chi_{1,n}$ - сопротивление связи между основной и корректирующими обмотками, определяемое отношением $U_{n2} / I_{1,n}$, χ_{Sn} - сопротивление рассеяния корректирующих обмоток блоков, равное ωL_{Sn} , где L_{Sn} - индуктивность рассеяния, Z_{n2} - величина активного

сопротивления корректирующей обмотки блока и $X_{\beta n}, Z_{\beta n}$ - значения соответствующих реактивных и активных сопротивлений, вносимых в цепи коррекции из первичного контура питания. В этом же выражении X_0 - среднее значение реактивного сопротивления параллельного соединения корректирующих обмоток всех $N-1$ блоков и ΔX_{0n} - разность между X_0 и сопротивлением параллельного соединения всех N блоков, кроме n -го.

Обозначим средние значения основных параметров, входящих в (I), через $X_{1,0}$ и R_0 , а отклонения этих параметров для n -го блока через $\Delta X_n, \Delta R_{n1}, \Delta R_{n2}$. После подстановки их в (I), разложим (I) по степеням $\Delta X_n, \Delta X_{0n}$ и $X_{sn} + X_{\beta n}$, с учетом малости отклонений. В полученном выражении только первый член не зависит от индивидуальных параметров блоков и имеет вид:

$$\Phi_{Sn} = I_{11} R_0 \frac{X_0}{X_{1,0} + X_0} \sum_{i=1}^{i=N} \xi(i) \quad (2)$$

Для того чтобы поле в каждом блоке описывалось выражением (2), необходимо выполнить условие:

$$\frac{\Delta X_n}{X_{1,0} + X_0} = \frac{\Delta R_{n2}}{R_{n2}} + \frac{\Delta X_{0n}}{X_{0n}} - \frac{\Delta X_{0n} + X_{sn} + X_{\beta n}}{X_{1,0} + X_0} + \frac{\xi(n)}{X_0} \sum_{i=1}^{i=N} \xi(i) \left\{ \frac{\Delta R_{n1} - \Delta R_{n2}}{R_{n2}} \left(1 - \frac{X_{sn} + X_{\beta n}}{X_{1,0} + X_0} \right) + \frac{R_{n1} (X_{sn} + X_{\beta n})}{R_{n2} (X_{1,0} + X_0)} \right\} \quad (3)$$

Величина $\frac{\Delta X_n}{X_{1,0} + X_0}$ подбирается с помощью согласующего элемента. Выполнение условия (3) для каждого блока позволит получить одинаковость магнитных потоков Φ_{Sn} при практически

произвольных технологических отклонениях параметров блоков и при произвольной форме токораспределения.

Однако при изменении закона токораспределения $\xi(n)$ на $\Delta \xi(n)$ равенство (3) может быть удовлетворено, если отношение $\frac{\Delta X_n}{X_{1,0} + X_0}$ изменить на величину $\frac{\delta \Delta X_n}{X_{1,0} + X_0}$:

$$\frac{\delta \Delta X_n}{X_{1,0} + X_0} = \frac{\Delta \xi(n)}{\sum_{i=1}^{i=N} \xi(i)} \left\{ \frac{X_{1,0} + X_0}{X_0} \left[\frac{\Delta R_{n1} - \Delta R_{n2}}{R_{n2}} \left(1 - \frac{X_{sn} + X_{\beta n}}{X_{1,0} + X_0} \right) + \frac{R_{n1} (X_{sn} + X_{\beta n})}{R_{n2} (X_{1,0} + X_0)} \right] \right\} \quad (4)$$

Эта величина определяет величину возмущения, возникающего в n -ом блоке, если значение корректирующего параметра $\frac{\Delta X_n}{X_{1,0} + X_0}$ не изменено в соответствии с (4). Величина $X_{1,0} + X_0$ с хорошей точностью равна величине $X_0 \sum_{i=1}^{i=N} \xi(i)$. Кроме того, в круглых скобках пренебрежем членом $\frac{X_{sn} + X_{\beta n}}{X_{1,0} + X_0}$ по сравнению с единицей. Тогда (4) переписется в виде:

$$\frac{\delta \Delta X_n}{X_{1,0} + X_0} \approx \Delta \xi(n) \left(\frac{\Delta R_{n1} - \Delta R_{n2}}{R_{n2}} + \frac{R_{n1} X_{sn} + X_{\beta n}}{R_{n2} X_{1,0} + X_0} \right) \quad (5)$$

Таким образом, абсолютная величина возмущения среднего значения поля в блоке, которая в обычном электромагните определяется значением $\Delta \xi(n)$, в самобалансированном ускорителе будет ослаблена в $\sim \left(\frac{\Delta R_{n1} - \Delta R_{n2}}{R_{n2}} + \frac{R_{n1} X_{sn}}{R_{n2} X_{1,0} + X_0} \right)$ раз.

Однако, если при изготовлении блоков выполнить условие:

$$\frac{\Delta R_{n2} - \Delta R_{n1}}{R_{n2}} = \frac{R_{n1} X_{s0}}{R_{n2} X_{1,0} + X_0} \quad (6)$$

где $X_{s0} = X_{sn} + \Delta X_{sn}$, то остаточное возмущение в n -ом блоке определится выражением:

$$\frac{\delta \Delta X_n}{X_{1,0} + X_0} \approx \Delta \xi(n) \frac{\Delta X_{sn}}{X_{1,0} + X_0} \quad (7)$$

Выполнение условия (6) практически решает задачу абсолютной самобалансировки электромагнита.

Результаты экспериментального исследования основного соотношения самобалансировки (3) представлены в таблице I.

Экспериментальное исследование процесса самобалансировки осуществлено на специальном электромагните, состоящем из девяти блоков. Блоки снабжены тремя обмотками: основная - 200 витков, корректирующая - 200 витков и дополнительная корректирующая - 20 витков. К дополнительным корректирующим обмоткам подключены согласующие автотрансформаторы, имеющие по 32 витка, намотанных на ферритовый торроидальный сердечник. Средние значения напряженности магнитного поля в блоках измерялись с помощью безжелезной катушки. В таблице I даны измеренные значения напряжений на концах корректирующих обмоток U_{2n}^1 и U_{2n} и, соответственно, значения X_n^1 и X_n до и после подбора согласующего параметра $\frac{\Delta X_n}{X_{1,0} + X_0}$. Далее, на основании измеренных значений напряжений, наводимых на датчик поля $U_{gn}^{(1)}$ и $U_{gn}^{(2)}$, определены значения R_{n1} и R_{n2} . Измерены также значения X_{on} , Z_n и $\frac{X_{sn} + X_{en}}{X_{1,0} + X_0}$. Последние две графы таблицы I представляют значения рассчитанных и измеренных значений согласующих параметров блоков. Расчеты проведены по (3) с использованием приведенных в таблице измеренных параметров блоков. В таблице даны средние значения основных параметров экспериментальной установки: $X_{1,0}$, X_0 , R_0 .

В таблице II даны результаты измерения отклонений среднего значения напряженности поля в блоках до и после включения цепей самобалансировки. Как видно из таблицы, максимальные зна-

Таблица II

№№ блоков	$\frac{\Delta H}{H_0}$ нач. (%)	$\frac{\Delta H}{H_0}$ ост. (%)
I	-0,854	0,00
2	-9,00	+0,128
3	+0,004	+0,080
4	+9,200	+0,110
5	-6,400	-0,128
6	-3,840	+0,085
7	-4,270	0,00
8	+9,630	+0,128
9	+7,470	+0,108

Таблица III

№№ блоков	φ нач.	φ ост.
I	5°45	0°10
2	1°45	0°10
3	6°20	0°15
4	6°20	0°00
5	4°35	0°00
6	4°35	0°20
7	6°55	0°00
8	7°15	0°00
9	0°00	0°00

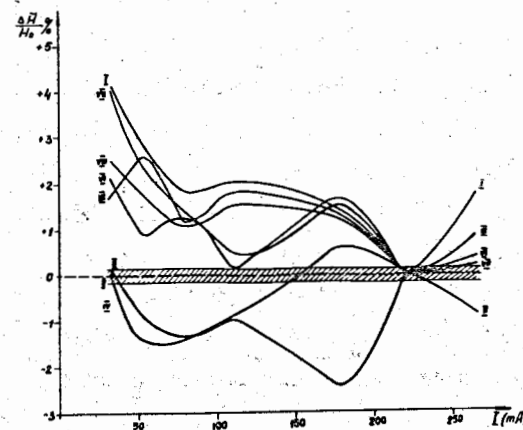


Рис.2. Подавление цепями самобалансировки ошибок поля, возникающих из-за неоднородности характеристик намагничивания сердечников блоков.

Таблица I

№ бл.	$U_{2,n}$ в.	$U'_{2,n}$ в.	X_n ом	X'_n ом	$U_{gn}^{(1)}$ мв	R_{n1} (вс/а) $\cdot 10^{-5}$	$U_{gn}^{(2)}$ мв	R_{n2} (вс/а) $\cdot 10^{-5}$	$\frac{\Delta R_{n2}}{R_{n2}}$ %%
1	1,384	1,44	6,92	7,2	46,2	1,074	46,4	1,08	-0,952
2	1,28	1,32	6,4	6,6	42,6	0,99	44,4	1,032	-5,61
3	1,42	1,42	7,1	7,1	47,0	1,093	49,2	1,145	+4,8
4	1,53	1,50	7,65	7,5	51,1	1,188	51,4	1,192	+8,38
5	1,31	1,34	6,55	6,7	43,8	1,018	45,4	1,053	-3,5
6	1,35	1,35	6,75	6,75	45,0	1,046	46,6	1,083	-0,645
7	1,34	1,36	6,7	6,8	44,8	1,041	46,5	1,082	-0,738
8	1,53	1,54	7,65	7,7	51,3	1,193	52,5	1,22	+10,66
9	1,51	1,52	7,55	7,6	50,3	1,170	52,1	1,21	+9,93

№ бл.	$\frac{\Delta R_{n1}}{R_{n2}}$ %%	X_{on} ом	$\frac{\Delta X_{on}}{X_0}$ %%	$U_{gn}^{(1)}$ к.з. мв	τ_n ом	$\frac{X_{sat} X_{0n}}{X_{10} + X_0}$ %%	$\frac{\Delta X_n}{X_{10} + X_0}$ (расчет) %%	$\frac{\Delta X_n}{X_{10} + X_0}$ (экспер) %%
1	-1,51	0,876	0	4,45	0,6	5,5	-1,51	-1,39
2	-9,7	0,885	+1,03	4,35	0,45	7,8	-8,63	-8,0
3	+0,436	0,873	-0,343	4,65	0,47	8,0	+0,07	+0,84
4	+8,12	0,876	-1,03	3,82	0,48	5,0	+7,103	+7,8
5	-6,84	0,882	+0,685	4,5	0,48	7,2	-6,165	-6,1
6	-4,06	0,879	+0,343	4,54	0,48	7,4	-3,712	-3,58
7	-4,52	0,881	+0,57	4,84	0,48	8,2	-3,968	-4,18
8	+8,45	0,867	-1,03	4,7	0,59	6,5	+7,415	+7,85
9	+6,61	0,866	-1,14	4,78	0,59	6,7	+5,47	+6,54

Примечания: средние значения параметров блоков:

$$R_0 = 1,0903 \cdot 10^{-5} \text{ вб/а}; \quad X_{1,0} = 7,03 \text{ ом};$$

$$X_0 = 0,876 \text{ ом}; \quad X_{1,0} + X_0 = 7,906 \text{ ом}.$$

После самобалансировки U_{gn} во всех блоках равно 46,8 мв.

чения остаточных возмущений примерно на два порядка меньше значений, существовавших до включения цепей самобалансировки. Полученная точность самобалансировки определяется предельной точностью подбора согласующего параметра, которая обеспечивалась в экспериментальной установке.

Анализ влияния активного сопротивления в цепях самобалансирующих обмоток на процесс самобалансировки показал, что требуемое количественное соотношение между $X_{1,n}$ и Z_n определяется выражением:

$$Z_{n,гон} = \sqrt{2 \frac{|\delta|}{|\Delta \xi|_{\max}}} (X_n + X_0), \quad (8)$$

где δ — допустимая величина относительной ошибки поля в блоке и

$$\Delta \xi_{\max} = \left[\frac{N \xi(n)}{\sum_{i=1}^N \xi(i)} - 1 \right]. \quad (9)$$

Исследована степень подавления сдвигов фаз между магнитными потоками в отдельных блоках в присутствии цепей самобалансировки.

Величина остаточного сдвига фазы определяется выражением:

$$t_{g \varphi_{п.ост.}} = \frac{\xi(n) \left(\frac{\Delta R_{n1} - \Delta R_{n2}}{R_{n2}} + \frac{R_{n1} X_{sn} + X_{0n}}{R_{n2} X_{1,0} + X_0} \right)}{\frac{X_0}{X_{1,0} + X_0} \sum_{l=1}^{i=N} \xi(l)} t_{g \varphi_n}. \quad (10)$$

В таблице III даны результаты измерения степени подавления фазовых сдвигов между магнитными потоками в блоках. Измеренные значения $\varphi_{п.ост.}$ хорошо согласуются с вычисленными по формуле (10), с использованием конкретных параметров экспериментального электромагнита, приведенных в таблице I.

Определена степень подавления ошибок поля, возникающих из-за взаимного отклонения форм характеристик намагничивания в блоках электромагнита. Для этого величины $R_{nl}(I_1)$, $X_{ln}(I_1)$, $X_o(I_1)$ в (I) представлены в виде степенных рядов. В результате получено выражение для отклонения поля в блоках из-за неодинаковости Н-В характеристик:

$$\Delta \Phi_{1sn} \approx \frac{X_{sn} + X_{ln}}{X_{1,0} + X_o} \left\{ [I_{11}\xi(n)]^2 \Delta \alpha_n R_{nl} + [I_{11}\xi(n)]^3 \Delta \beta_n R_{nl} + \dots \right\} \quad (II)$$

где $\Delta \alpha_n$ и $\Delta \beta_n$ — отклонения коэффициентов нелинейности характеристик намагничивания отдельных блоков от усреднённых значений.

Итак, ошибки поля, возникающие из-за неоднородности характеристик стали, в самобалансированном электромагните ослабляются примерно в $\frac{X_{sn} + X_{ln}}{X_{1,0} + X_o}$ раз.

На рис. 2 графически показаны экспериментальные результаты подавления ошибок данного типа. Сплошными кривыми показаны зависимости $\frac{\Delta H_n}{H_o}(I_1)$ в отдельных блоках от величины силы тока до включения цепей самобалансировки. После включения эти кривые локализованы в заштрихованной области.

Рассмотрены две основные схемы коммутации блоков: "кольцевая", при которой корректирующие обмотки соединяются шинами, идущими параллельно электромагниту, и "радиальная", в которой соединения производятся индивидуальными линиями в районе геометрического центра ускорителя.

Если в кольцевой схеме сопротивление корректирующей обмотки блока обозначить через Z_2 , а сопротивление участка шин между соседними блоками через Z_1 , то величина относительной ошибки δ , возникающая из-за отличия Z_1 от нуля, определится выражением:

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{Z_1}{Z_2} N^2. \quad (I2)$$

Из этого выражения легко определить допустимую величину Z_1 при заданном δ . Для получения удовлетворительных значений δ , Z_1 оказывается настолько малой, что осуществление кольцевой схемы вызывает большие технические трудности. Радиальная коммутация блоков свободна от этого недостатка. Сопротивление соединяющих кабелей определяется формулой (8). Расчеты показывают, что для ускорителя с радиусом ~ 35 м сечение соединяющих проводов должно быть ~ 4 мм², при $\delta = 10^{-2}$.

Самобалансировка по участкам означает включение в цепь самобалансировки каждого двух блоков, отстоящих друг от друга на расстоянии, близком к половине длины волны бетатронных колебаний. В такой схеме возмущения в обоих блоках оказываются одинаковыми, поэтому вынужденное движение частиц описывается уравнением:

$$Z_{\text{лин}}(\theta) = 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(\frac{\ell}{2\pi} \right)^2 \frac{F(\theta) \Delta H}{2i \rho H_o} e^{i\pi M V (N-1)} \frac{\sin \pi M V N}{\sin \pi M V} \times \right. \\ \left. \times (1 - e^{-i4\pi \Delta V}) \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta) e^{-i\psi \theta} d\theta \right\}, \quad (I3)$$

где ΔV — отклонение V от величины 0,25. Член $(1 - e^{-i4\pi \Delta V})$ определяет уменьшение амплитуд колебаний частиц. Отклонение равновесной орбиты от идеальной определяется величиной среднеквадратичной ошибки поля в блоках. Резонансные искажения орбиты ослабляются в $(1 - e^{-i4\pi \Delta V})$ раз. При $\Delta V = 0$ резонансные искажения полностью отсутствуют. Поэтому допуск на ампли-

туду ближайшей гармонической составляющей ошибок управляющего поля может быть значительно ослаблен. При $\Delta V = 0,01$ амплитуда резонансного искажения орбиты ослабляется примерно в 10 раз. Осуществление цепей соединения блоков, как показывает приведенный в диссертации анализ, не представляет технических трудностей. Такая схема самобалансировки может быть с успехом осуществлена в уже действующих ускорителях.

В магнитных системах с разделенными функциями в цепь самобалансировки могут быть включены и квадрупольные линзы. Для этого в линзах устанавливаются четыре самобалансирующие обмотки. Включение самобалансирующих обмоток линз в систему самобалансировки позволяет устранить ошибки в законе азимутального распределения градиента поля.

Результаты экспериментального исследования степени подавления азимутальной неоднородности поля в широком диапазоне частот показаны на рис.3. Пунктирные ломаные показывают ход азимутальной неоднородности поля H_z/H_1 в блоках на разных частотах до включения цепей самобалансировки, а сплошные — после включения. Эксперимент подтверждает отсутствие на шкале частот критических точек, где эффект самобалансировки может быть отрицательным.

На рис.4 показаны осциллограммы подавления переходных процессов с помощью цепей самобалансировки в импульсных электромагнитах. Верхняя осциллограмма представляет собой наложение форм переходных процессов во всех девяти блоках при отключении цепей самобалансировки, нижняя — после включения этих цепей.

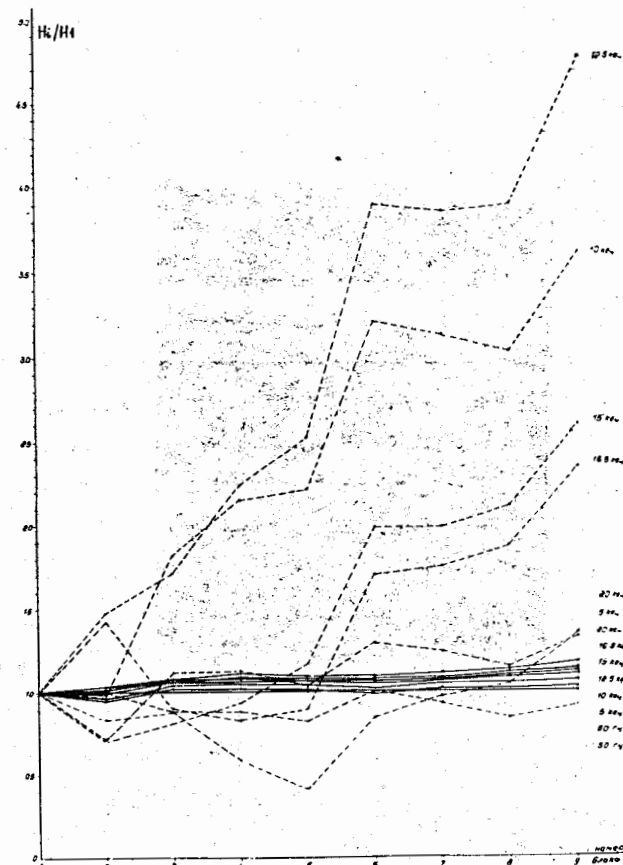


Рис.3. Подавление цепями самобалансировки азимутальной неоднородности поля в широком диапазоне частот питающего электромагнит тока.

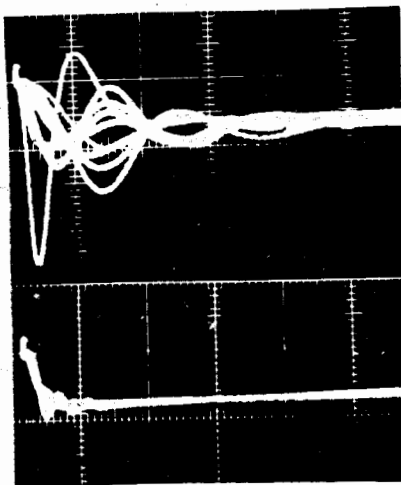


Рис.4. Подавление цепями самобалансировки переходных процессов в электромагнитах с импульсным питанием.

Цепи самобалансировки не устраняют ошибок, возникающих из-за наличия постоянной составляющей питания электромагнита и пространственных смещений блоков. По этой причине самобалансированный ускоритель нуждается также в разработке методов коррекции поля по анализу информации о пучке и по измерению распределения потерянных частиц. Результаты этих разработок приведены в третьей главе. Определение величины и характера возмущения поля в блоке осуществляется измерением параметров траектории пучка на его концах.

Исследования условий ввода частиц и компенсация грубых ошибок магнитного поля в момент инжекции могут быть осуществлены по информации о распределении потерянных частиц. Для этого в диссертации разработан следующий метод. С помощью фокусирующих линз, установленных на участке ввода, сильно вытягивается инжектируемый фазовый ε - эллипс. Вокруг a -эллипса кольцевого ускорителя легко определить области, соответствующие определенным участкам азимута. Если частица находится вне a -эллипса, то она будет потеряна в одном из найденных участков азимута. Вращая оси ε - эллипса в пределах π и измеряя распределение потерянных частиц по азимуту, можно определить как смещение центра ε -эллипса относительно начала координат τ_0, τ'_0 , так и величину ошибок магнитного поля ускорителя. Показано, что постоянная составляющая распределения потерянных частиц ответственна за смещение центров a и ε -эллипсов. После совмещения центров эллипсов асимметрия распределения потерянных частиц позволяет определить ошибки поля в магнитной системе.

Для создания плоской вершины поля в самобалансированном электромагните предлагается использовать дополнительные устройства - резервные магнитные блоки или специальные дроссели, снабженные первичной и вторичной обмотками. Вторичные обмотки подключаются к

цепям параллельного соединения корректирующих обмоток блоков электромагнита. Ток в первичной цепи дополнительных устройств, I_{per} , начиная с некоторой фазы магнитного цикла изменяется по закону:

$$I_{per} = I_{1,0} \left(\frac{A}{n \sin \omega t} - 1 \right) \frac{n}{m}, \quad (I4)$$

при $t_1 < t < t_2$.

В этом выражении (справедливом для $t_1 < t < t_2$) A - константа, n - число блоков электромагнита, m - число резервных блоков или эквивалентных дросселей. Такое изменение I_{per} обеспечивает плоскую вершину поля с той точностью, с которой выполняется условие (I4).

Экспериментальная проверка подтверждает правильность метода создания плоской вершины и полученного закона изменения регулирующего тока. С помощью описанного метода могут быть созданы и плоские ступеньки на восходящей ветви магнитного цикла.

Вопросам вывода пучков из самобалансированного ускорителя и созданию плоской вершины посвящена четвертая глава.

Исследования датчиков циркулирующего и внешних пучков электронных ускорителей представлены в пятой главе. Здесь разработана теория магнито-индукционных датчиков различных конструкций: одноконтурных и двухконтурных, безжелезных и с ферритовым сердечником. Экспериментальное исследование датчиков показало, что полученные формулы удовлетворяют требованиям инженерного расчёта.

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследований датчика абсолютного числа частиц, ускоряемых в вакуумной камере ускорителя. Датчик представляет собой замкнутый электрод, установленный в свободном промежутке вакуумной камеры ускорителя. Электростатический заряд, наводимый пучком ускоряемых частиц на замкнутый электрод, компенсируется объёмным зарядом, который возникает вследствие ионизации остаточного газа синхротронным излучением.

Экспериментальная проверка прибора и сравнение результатов измерений с показаниями квантометра Вильсона показали правильность теоретических вычислений постоянной прибора:

$$K = \frac{\ell T f}{\tau L_{orb} \delta} \quad \text{и} \quad Q_{orb} \delta = \bar{I} \frac{\tau L_{orb} \delta}{\ell T f}. \quad (I5)$$

Здесь \bar{I} - сила тока, измеренная в цепи электрода, $Q_{orb} \delta$ - заряд на орбите, ℓ - длина электрода вдоль пучка, $L_{orb} \delta$ - длина орбиты, T - длительность цикла ускорения, τ - длительность одного оборота и f - частота повторения циклов. Абсолютная точность измерения данным методом зависит от относительной скорости частиц, β , и от точности измерительной аппаратуры. В таблице IV приведены результаты экспериментального исследования предложенного метода.

Наиболее важным параметром гамма-пучков ускорителя является стабильность края спектра тормозного излучения.

В диссертации, также впервые, сформулирован принцип непрерывного измерения этого параметра с использованием свойств переходной кривой электронно-фотонного ливня в веществе. Принцип измерения заключается в том, что на двух разных глубинах вещества, соответствующих восходящей и нисходящей ветвям переходной кривой, измеряется разность ионизации, создаваемая ливнем в ионизационных камерах. Измерения, проведенные на гамма-пучках Ереванского синхротрона в диапазоне максимальных энергий, $E_{\gamma max}$, от 1,5 до 4,5 Гэв, показали, что прибор реально обеспечивает измерение ΔE_{γ} с точностью $\sim 10^{-4}$ от $E_{\gamma max}$.

Для управления пространственным положением осей внешних пучков разработаны датчики положения гамма-пучка, включающие в себя ионизационные камеры с симметрично разрезанными собирающими

Таблица IV

Е (ГэВ) макс.	Т ускорения (мсек)	I квантометра (а)	I монитора (а)	$N\bar{e}$ определенных по квантометру	$N\bar{e}$ определенных по монитору	$\frac{\bar{I}}{N\bar{e}}$ МОНИТОР квантометр (а/электрон.)
4,6439	9,3783	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$4,53 \cdot 10^{-8}$	$6,865 \cdot 10^9$	$6,969 \cdot 10^9$	$6,599 \cdot 10^{-18}$
4,64	8,9264	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$7,43 \cdot 10^9$	$7,619 \cdot 10^9$	$6,2 \cdot 10^{-18}$
3,95674	7,3424	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$3,2527 \cdot 10^{-8}$	$6,8844 \cdot 10^9$	$6,8545 \cdot 10^9$	$4,724 \cdot 10^{-18}$
3,377	6,3164	$1,3673 \cdot 10^{-5}$	$2,6364 \cdot 10^{-8}$	$6,72946 \cdot 10^9$	$6,7401 \cdot 10^9$	$3,923 \cdot 10^{-18}$
2,498	5,4053	$1,0017 \cdot 10^{-5}$	$1,8083 \cdot 10^{-8}$	$5,713 \cdot 10^9$	$5,6981 \cdot 10^9$	$3,168 \cdot 10^{-18}$
1,9127	4,496	$0,6008 \cdot 10^{-5}$	$0,98 \cdot 10^{-8}$	$4,136 \cdot 10^9$	$4,0275 \cdot 10^9$	$2,37 \cdot 10^{-18}$
1,3276	3,5597	$0,28902 \cdot 10^{-5}$	$0,4123 \cdot 10^{-8}$	$2,7015 \cdot 10^9$	$2,465 \cdot 10^9$	$1,527 \cdot 10^{-18}$
0,8101	2,716	$0,08982 \cdot 10^{-5}$	$0,09581 \cdot 10^{-8}$	$1,1802 \cdot 10^9$	$0,9704 \cdot 10^9$	$0,8117 \cdot 10^{-18}$
0,5626	2,1784	$0,0408 \cdot 10^{-5}$	$0,01495 \cdot 10^{-8}$	$0,7375 \cdot 10^9$	$0,2712 \cdot 10^9$	$0,2027 \cdot 10^{-18}$

или высоковольтными электродами. Такие устройства позволяют определить смещения оси пучка с точностью $\sim 0,1$ мм при интенсивности в пучке $\sim 10^{10}$ экв. γ -квантов/сек. Информация от этих датчиков может быть введена в замкнутую систему авторегулирования как предельной энергии спектра, так и пространственного положения оси пучка.

Разработана методика расчета ионизационных камер-датчиков пучка, позволяющая с точностью $\pm 5\%$ определить чувствительность их в диапазоне $E_{\gamma \max}$ от 1,5 до 4,5 Гэв.

Для измерения абсолютного значения числа фотонов в монохроматических пучках синхротронного излучения разработан метод, основанный на измерении линейной плотности ионизации, создаваемой пучком в воздухе.

Для этого предварительно были измерены коэффициенты полного линейного поглощения фотонов в воздухе для различных длин волн. Далее, полное число фотонов определялось по формуле:

$$N_{\text{фот.}} = \frac{N_{\text{ion.o.}} W}{\mu(\lambda) E_{\text{фот.}}} \quad (16)$$

где W - энергия, необходимая для образования одной пары ионов в воздухе, $E_{\text{фот.}}$ - энергия фотона, $N_{\text{фот.}}$ - число фотонов в пучке, $\mu(\lambda)$ - полный коэффициент линейного поглощения для данной длины волны, $N_{\text{ion.o.}}$ - число пар ионов, в месте выхода синхротронного пучка из вакуумной системы.

С помощью этого метода был измерен спектр синхротронного излучения Ереванского ускорителя в рентгеновском диапазоне длин волн. Измерения, с точностью до коэффициента отражения кристаллического монохроматора, совпали с теоретическими вычислениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые сформулирован, теоретически и экспериментально исследован принцип самобалансировки магнитной системы ускорителя.

2. В результате этих исследований показано, что система самобалансировки практически полностью устраняет ошибки переменной составляющей управляющего магнитного поля в блоках независимо от природы возникновения возмущений. Это позволяет облегчить как процесс изготовления большого числа блоков электромагнита, так и упростить требования к строгой однородности силы тока в обмотках возбуждения электромагнита.

Величины остаточных возмущений поля определяются точностью установки согласующих параметров.

3. Впервые разработан и исследован метод самобалансировки магнитной системы по участкам. В такой схеме цепями самобалансировки охватывается каждая пара блоков, отстоящих друг от друга на расстоянии, близком к половине длины волны бетатронных колебаний. Возникающее в любом блоке возмущение среднего значения поля автоматически создает компенсирующее его антивозмущение в блоке, с которым осуществлена цепь самобалансировки.

Резонансные искажения равновесной орбиты пучка в магнитной системе, охваченной цепями самобалансировки по участкам, примерно на один порядок слабее искажений, которые возникают при отсутствии этих цепей. Соответственно смягчаются допуски на амплитуды ближайших гармонических составляющих ошибок управляющего магнитного поля. Такая схема самобалансировки перспективна для повышения стабильности уже построенных ускорителей.

4. В магнитных системах с отдельными функциями цепями самобалансировки могут быть охвачены не только заворачивающие, но и градиентные магниты. Создание цепей самобалансировки в таких электромагнитах устраняет возникновение ошибок в законе азимутального распределения градиента поля.

5. Исследованы возможные варианты создания плоской вершины поля в самобалансированном электромагните. Одна возможность заключается в изменении во времени величины специальной индуктивной нагрузки, подключенной к цепям параллельного соединения корректирующих обмоток блоков. Другая возможность заключается в изменении во времени силы тока в первичных обмотках специальных дросселей, вторичные обмотки которых подключены к цепям самобалансировки. Найден закон изменения указанных параметров для обеспечения требуемой равномерности вершины поля.

С помощью этих же методов могут быть осуществлены и плоские ступеньки на возрастающей ветви магнитного цикла. На этих ступеньках можно осуществить частичный вывод пучков.

6. Разработаны методы осуществления коррекций параметров магнитного поля как по информации о пучке (использование позитивной информации), так и о распределении потерянных частиц в течение всего цикла ускорения (использование негативной информации). Эти методы, в дополнение к системе самобалансировки, позволяют решить большой круг задач, связанных с проблемой авторегулирования современных ускорителей.

7. Разработаны методы расчета и конструирования большого числа типов магнито-индукционных датчиков пучка, используемых в современных электронных ускорителях. Определены наиболее перспективные типы и конструкции датчиков.

8 . Впервые разработан метод точного измерения числа электронов, ускоряемых на орбите. Эксперименты показали, что точность измерения этим методом лимитируется главным образом точностью измерительной электронной аппаратуры. Использование метода позволяет, кроме решения большого круга задач, связанных с ускорителем, осуществлять многие физические эксперименты по электророждению и $e\gamma$ -рассеянию на внутреннем пучке.

9 . Впервые разработан датчик предельной энергии спектра пучков гамма-квантов электронных ускорителей. Экспериментальная проверка датчика показала, что точность измерения смещения края спектра имеет порядок 10^{-4} от значения максимальной энергии. Использование этого датчика позволит осуществить стабилизацию энергии внешних пучков и позволит в работах по фоторождению значительно повысить энергетическое разрешение исследуемых процессов.

10 . Разработаны методы расчета и конструирования основных типов датчиков внешних пучков электронных ускорителей. На основе этих разработок созданы датчики положения центра тяжести гамма-пучка, обеспечивающие измерение смещения оси пучка с точностью не хуже 0,1 мм.

11 . Разработан метод измерения абсолютного числа фотонов в монохроматическом пучке синхротронного излучения электронного ускорителя. На основании этих разработок проведены измерения основных характеристик синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне длин волн Ереванского ускорителя.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения и содержит 198 страниц, 34 рисунка и библиографию на 9 страницах из 95 названий.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах .

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И.П. Карабеков, Ю.Р. Назарян. " О возможности самобалансирования магнитного поля в электронных синхротронах". Труды УП Международной конференции по ускорителям заряженных частиц (1969) т.1, стр. 412, АН Арм.ССР, Ереван, 1970.

2. И.П. Карабеков, Ю.Р. Назарян. " О возможности использования принципа самобалансированного поля в протонных синхротронах ". Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (1970) т.1, стр. 162, "Наука", Москва, 1972.

3. И.П. Карабеков, В.К. Кроль и др. " Возможный вариант кибернетизации электронных синхротронов на высокие и сверхвысокие энергии ". Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (ноябрь 1972, Москва), т.2, стр. 77, изд. " Наука ", Москва, 1973.

4. И.П. Карабеков. " Исследование процесса самобалансировки магнитных систем ускорителей ". Научное сообщение Ереванского физического института, ЕФИ - (10) - 72.

5. Ю.Г. Агбалян, А.И. Алиханян, С.К. Есин, И.П. Карабеков и др. В кн. " Международная конференция по ускорителям. Дубна, 1963 " стр. 235, Атомиздат, Москва, 1964.

6. A.I.Alikhanian, G.V.Badalian, A.I.Barishev, E.V. Grigorian, A.A.Egiazarian, I.P.Karabekov et al. Proceed. of the Sixth International Conf. on High Energy Accelerators.p.401, Cambridge, September, 1967.

7. И.П. Карабеков. " Определение возмущений параметров магнитной и ускоряющей систем электронного синхротрона на основе анализа информации о пучке ", ж. Атомная энергия, т. 18, вып. 1, стр.18 (1965).

8. И.П. Карабеков. " Универсальная схема коррекции маг-

нитного поля в синхротронах на большой энергии ", ж. Атомная Энергия, т.27, вып.5, стр.424 (1969).

9. И.П. Карабеков. " Определение возмущений параметров ускорителя по информации о распределении потерянных частиц ", ж. Атомная Энергия, т.21, вып.5, стр.404 (1966).

10. А.З. Бабалян, Г.С. Вартанян, И.П. Карабеков и др. " Логика систем авторегулирования по пучку отдельных параметров Ереванского синхротрона АРУС ". Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (1968), т.2, стр.36, ВИНТИ, Москва, 1970.

11. В.К. Кроль, И.П. Карабеков, Н.Ж. Таманян. " Устройство для пространственного регулирования по пучку элементов магнитных систем ускорителей ". Доклад на Всесоюзной конференции по разработке и практическому применению электронных ускорителей ". Аннотация в кн. " Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Тезисы докладов ". стр.127-128, изд. Томского университета, Томск, 1972.

12. Г.А. Аракелян, Г.С. Вартанян, С.К. Есин, И.П. Карабеков и др. " Приборы и методы измерения и контроля пространственных характеристик внешних пучков АРУС ". Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (1970), т.2, стр.108, "Наука", Москва, 1972.

13. И.П. Карабеков, М.А. Мартиросян. " Расчет и конструирование сигнальных электродов ускорителей ", ж. Атомная Энергия, т.13, вып.4, стр.337, 1962.

14. I.P.Karabekov, et al. Beam Measurement Apparatus for 6 GeV Yerevan Electron Accelerator. Proceedings of the Sixth International Conference on High Energy Accelerators. p.360, Cambridge, September 1967.

15. И.П. Карабеков, А.М. Коцинян и др. " Метод измерения абсолютного значения числа частиц, ускоряемых в вакуумной камере электронного синхротрона ". Научное сообщение ЕФИ, ЕФИ-23 (73).

16. Г.А. Аракелян, Г.С. Вартанян, С.К. Есин, И.П. Карабеков и др. " Измерения и контроль пространственных характеристик внешних пучков Ереванского ускорителя электронов ". ж. ПТЭ, № 4, стр.46, 1971.

17. И. П. Карабеков и др. " Усовершенствование приборов измерения параметров выведенных пучков электронного синхротрона на 6 Гэв Ереванского физического института ". " Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц " (1972), т.2, стр.136, "Наука", Москва, 1973.

18. Р.О. Абрамян, Л.А. Ананова, Г.В. Бадалян, А.А. Даллакян, С.К. Есин, И.П. Карабеков и др. " Система вывода электронов из Ереванского синхротрона ". " Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц " (1970), т.2, стр.187, Наука, Москва, 1972.

19. А.З. Бабалян, Г.С. Вартанян, И.П. Карабеков и др. " Метод измерения мгновенных значений координат пучка в камере ускорителя ", ж. ПТЭ, №5, стр.17, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 мая 1974 года.