

С 345e4

A-695

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

10-3002-1



В.Н. Аносов, Ю.Н. Денисов, Н.И. Дьяков,
В.И. Прилипко, Ю.И. Сусов, П.Т. Шишлянников

АНАЛИЗАТОР ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

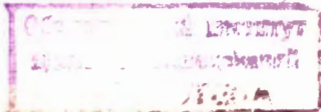
1966

УД 221, чр

10-3002-1

В.Н. Аносов, Ю.Н. Денисов, Н.И. Дьяков,
В.И. Прилипко, Ю.И. Сусов, П.Т. Шишлянников

АНАЛИЗАТОР ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ



Формирование необходимой конфигурации магнитных полей циклических ускорителей является одной из основных задач, решаемых при сооружении этих уникальных физических приборов. Особенно сложен и трудоемок этот процесс при создании нужной топографии магнитного поля ускорителей относительно нового типа, таких, например, как изохронные циклотроны. Жесткие допуски на величину среднего поля $H_0(R)$, амплитуды $H_{mk}(R)$ и начальной фазы $\phi_{ok}(R)$ ряда гармоник на каждом радиусе R_i приводят к тому, что единственным приемлемым методом шиммирования является метод последовательного приближения к нужному закону распределения магнитного поля путем многократного измерения характеристик поля и последующей коррекции конфигурации магнитной системы или изменения тока в обмотках электромагнита ускорителя. Таким образом, каждый цикл процесса шиммирования состоит из трех операций: измерения азимутального распределения магнитного поля $H_z(\phi)$ на одном или нескольких радиусах R_i ; математической обработки результатов магнитных измерений; внесения необходимых изменений в характеристики магнитной системы ускорителя. Для сокращения суммарного времени, необходимого для шиммирования поля (обычно составляющего несколько месяцев), нужно стремиться сократить время выполнения каждой из этих операций. Этой задаче, применительно к разрабатываемому в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ релятивистскому циклотрону^{/1/}, и служит описываемый цифровой анализатор гармоник магнитного поля. Созданный специализированный счетный прибор несложен в управлении, легко связывается непосредственно с измерителями магнитного поля и позволяет оперативно с минимальной затратой времени выполнять очень трудоемкую операцию процесса шиммирования – математическую обработку результатов магнитных измерений. Кроме того, и после завершения сооружения и ввода ускорителя в эксплуатацию анализатор может использоваться для автоматической коррекции топографии магнитного поля в "особо опасных" зонах ускорения.

Гармонический анализ магнитного поля производится по формулам Бесселя^{/2/}

$$H_0 = \frac{1}{2\nu} \cdot \sum_{\lambda=1}^{\lambda=\nu} H_{\lambda} . \quad (1)$$

$$A_k = \frac{1}{\nu} \cdot \sum_{\lambda=1}^{\lambda=2\nu} H_\lambda \cdot \cos k \cdot \frac{\pi}{\nu} \cdot \lambda, \quad (2)$$

$$B_k = \frac{1}{\nu} \cdot \sum_{\lambda=1}^{\lambda=2\nu} H_\lambda \cdot \sin k \cdot \frac{\pi}{\nu} \cdot \lambda, \quad (3)$$

где H_0 — среднее поле на данном радиусе R_1 , 2ν — количество одинаковых интервалов, на которые разбивается период функции $H_z(\phi)$, равный в рассматриваемом случае 2π ; H_λ — величины напряженностей магнитного поля в точках λ на границах интервалов; λ — порядковый номер точки измерения $\lambda = 1, 2 \dots 2\nu$; k — номер вычисляемой гармоники.

По полученным значениям коэффициентов A_k и B_k вычисляются амплитуда H_{mk} и начальная фаза ϕ_{ok} k -ой гармоники. Амплитуда определяется по формуле

$$H_{mk} = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad (4)$$

а фаза — по формуле

$$\phi_{ok} = \arctg \frac{A_k}{B_k}. \quad (5)$$

Блок-схема прибора приведена на рис. 1.

Разработанный анализатор гармоник представляет собой по сути дела специализированную вычислительную машину, предназначенную для решения одного класса задач — вычисления амплитуд и фаз ряда гармоник периодической функции $H_z(\phi)$, заданной определенным (2ν) количеством значений H_λ , в точках, равномерно распределенных по периоду 2π ^{x/}.

Частные значения функции распределения магнитного поля H_λ вводятся в машину путем набора на шестиразрядной десятичной клавиатуре. Выбранная разрядность обосновывается тем, что величина напряженности магнитного поля в электромагнитах с железными сердечниками обычно не превышает 20–30 т.э, а точность, с которой необходимо измерять поле при формировании заданной топографии магнитного поля релятивистского циклотрона, должна быть не хуже 0,1–0,2 э. Максимальные значения поля, которые при необходимости могут быть введены в машину при помощи такой клавиатуры, составляют 99999,9 э.

^{x/} Более подробно характеристики каждого блока прибора приводятся в отдельных работах, специально посвященных описанию характерных особенностей этих устройств.

В дальнейшем предполагается заменить ручной ввод исходных данных H_{λ} , автоматическим вводом путем непосредственной связи устройства ввода машины с цифровыми регистрирующими приборами измерителей магнитного поля, например, автоматическими электронно-счетными частотомерами ядерных магнитометров.

Необходимое число измерений магнитного поля, производимых на каждом радиусе $R_1 = 2\nu$, зависит от номеров гармоник, которые предполагается определять по результатам этого цикла измерений, а также от того, с какой точностью необходимо их вычислять на данной стадии процесса шиммирования. Точность выделения гармоник функции $H_z(\phi)$ по формулам Бесселя определяется соотношениями^{/2/}

$$A'_k = A_k - (A_{2\nu-k} + A_{2\nu+k}) - (A_{4\nu-k} + A_{4\nu+k}) - \dots, \quad (6)$$

$$B'_k = B_k + (B_{2\nu-k} - B_{2\nu+k}) + (B_{4\nu-k} - B_{4\nu+k}) + \dots, \quad (7)$$

где A'_k и B'_k — истинные (точные) значения коэффициентов Фурье k -ой гармоники кривой $H_z(\phi)$; A_k и B_k — коэффициенты Фурье k -ой гармоники, полученные по формулам Бесселя.

Из выражений (6) и (7) следует, что коэффициенты Фурье k -ой гармоники, полученные по формулам Бесселя, отличаются от своих точных значений на величину суммы коэффициентов Фурье гармоник с порядками $(2\nu - k)$, $(2\nu + k)$, $(4\nu - k)$, $(4\nu + k)$... и т.д. Таким образом, чем больше значений функции $H_z(\phi)$ будет измерено на каждом радиусе R_1 тем ближе к истинным величинам будут коэффициенты Фурье k -ой гармоники, полученные по формулам Бесселя, поскольку известно, что амплитуды высших гармоник магнитного поля в релятивистском циклотроне быстро падают с ростом порядка гармоники. Например, на радиусе $R = 53$ см модели магнитной системы релятивистского циклотрона^{/4/} было измерено 144 значения поля H_{λ} и по полученным данным произведен гармонический анализ функции $H_z(\phi)$ по формулам Бесселя на машине М-20. В результате анализа были получены следующие величины амплитуд ряда гармоник поля: $H_{m1} = 31,8$ э; $H_{m2} = 19,3$ э; $H_{m4} = 13,2$ э; $H_{m8} = 3822,4$ э; $H_{m16} = 305,8$ э; $H_{m32} = 27,3$ э; $H_{m40} = 11,8$ э; $H_{m48} = 4,2$ э. Приведенный пример подтверждает, что амплитуды высших гармоник в реальном поле релятивистского циклотрона быстро падают.

Для проверки влияния количества точек измерения 2ν на точность выделения гармоник функции $H_z(\phi)$ из имеющихся 144 значений поля H_{λ} было выбрано 36 равноотстоящих друг от друга по периоду 2π значений и по этим 36 точкам также произведен гармонический анализ по формулам Бесселя. В результате были получены амплитуды гармоник H_{m1} , H_{m2} , H_{m4} , H_{m8} , отличающиеся на -11 э, $-9,3$ э, $+6,8$ э, $-13,9$ э от соответствующих значений, полученных при анализе по 144 точкам. Отличия в полученных величинах амплитуд согласуются с результатом оценки по формулам (6) и (7).

Таким образом, при выборе количества измерений поля 2ν на некотором радиусе R_1 следует учитывать порядок выделяемых гармоник и требования к точности вычисления амплитуд H_{mk} . Необходимая точность определения H_{mk} зависит от стадии, на которой находится процесс шиммирования поля. Например, на начальном этапе амплитуда первой гармоники может составлять 100 ± 200 э, а затем, в процессе шиммирования, она должна быть доведена до 1 ± 2 э. Следовательно, требуемая точность выделения первой гармоники в начале и конце процесса шиммирования и число точек измерения на периоде -2ν , определяющее эту точность, могут быть различными.

Применительно к проектируемому в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ релятивистскому циклотрону в анализаторе выбраны возможные значения 2ν , равные 24, 36, 48, 72 и 144. Прибор позволяет выделять гармоники следующих порядков: 1, 2, 3, 4, 8 и 8. Путем несложных изменений логики только одного блока анализатора — блока Sin можно расширить диапазон возможных значений как 2ν , так и k , не выходя однако за пределы $2\nu = 144$, поскольку для этого потребовалось бы значительно увеличить объем МОЗУ, запас свободных ячеек в котором составляет ≈ 100 . При необходимости к перечисленным гармоникам легко могут быть добавлены 12-ая и 16-ая.

Вводимые в анализатор шестизначные десятичные числа H_λ переводятся программным способом в двадцатизначный (не считая знакового) двоичный код [3] и засылаются в МОЗУ. МОЗУ машины объемом 165 двадцатичетырехразрядных двоичных чисел построено на основе двух кассет ферритовой памяти типа z (кассеты МОЗУ машины М-20) с полупроводниковым управлением. Кроме H_λ , в МОЗУ хранятся команды, которые изменяются в процессе счета по программе. Часть МОЗУ занимают рабочие ячейки.

Программа, по которой машина производит гармонический анализ, и константы, необходимые в процессе счета, хранятся в ПЗУ диодного типа объемом 178 двадцатидвухразрядных чисел.

В процессе вычисления коэффициентов Фурье A_k и B_k по формулам Бесселя необходимо получать значения $\sin k \cdot \frac{\pi}{\nu} \cdot \lambda$ и $\cos k \cdot \frac{\pi}{\nu} \cdot \lambda$, где λ изменяется от 1 до 2ν . Величины k и 2ν задаются с пульта управления анализатора в начале счета, поэтому выражение $k \cdot \frac{\pi}{\nu}$ постоянно для данного цикла анализа и может быть обозначено как

$$\Delta\alpha = k \cdot \frac{\pi}{\nu} . \quad (8)$$

Следовательно, в процессе счета необходимо получать значения тригонометрических функций

$$\sin \Delta\alpha \cdot 1, \quad \sin \Delta\alpha \cdot 2, \dots \dots \sin \Delta\alpha \cdot \lambda ;$$

$$\cos \Delta\alpha \cdot 1, \quad \cos \Delta\alpha \cdot 2, \dots \dots \cos \Delta\alpha \cdot \lambda ;$$

т.е. значения \sin и \cos углов, кратных некоторому постоянному шагу $\Delta\alpha$, величина которого определяется порядком выделяемой гармоники k и числом вводимых в анализатор значений функции $N_2(\phi) - 2\nu$. Эти значения \sin и \cos получаются в анализаторе при помощи специального блока - блока \sin , принцип построения которого выглядит следующим образом. По заданным с пульта управления анализатора значениям k и 2ν в блоке образуется соответствующий угловой шаг $\Delta\alpha$. Далее, при последовательных обращениях к этому блоку в процессе вычисления A_k и B_k в специальном регистре накапливается суммарное значение аргумента, которое автоматически приводится к углу в диапазоне $0^\circ \div 90^\circ$. При каждом новом обращении к блоку \sin по адресу, задаваемому этим регистром, из специального небольшого диодного ПЗУ на 37 чисел выбирается соответствующее значение \sin и \cos со знаком, зависящим от номера квадранта, в котором находилось суммарное значение аргумента.

Составление программы для реализации выбранного алгоритма счета с учетом максимальной экономичности выбираемых вариантов решений потребовало введения 16 различных арифметических и логических операций, выполняемых арифметическим устройством анализатора. В приборе применено арифметическое устройство параллельного типа, оперирующее с двадцатиразрядными (не считая знакового разряда) двоичными числами, в которых запятая фиксирована после знакового разряда. Тактовая частота управляющих импульсов в АУ равна 20 кГц. Большого быстродействия требовать от АУ анализатора нецелесообразно, поскольку при такой тактовой частоте время счета амплитуды и начальной фазы какой-либо гармоники, даже по максимальному числу точек $n = 2\nu = 144$, составляет ≈ 3 сек, что на 2-3 порядка меньше времени одного цикла измерения, в течение которого получают исходные данные для счета N_A на некотором радиусе R_1 . Времена выполнения анализатором различных операций приведены в таблице.

Т а б л и ц а 1

Наименование операции	Время выполнения в мксек
1. Умножение	3500
2. Деление	3500
3. Извлечение корня	7500
4. Сложение, сравнение по модулю и прочие короткие операции	200

Устройство управления анализатора гармоник построено по асинхронному принципу, т.е. для выполнения длинных и коротких операций отводится различное время. Асинхронное управление выбрано на том основании, что оно обеспечивает заданное время решения задачи $\approx 2 \div 3$ сек при гораздо более низкой тактовой частоте, чем синхронное управление. Это важно для обеспечения достаточной надежности устройства, тогда как в отношении сложности реализации применительно к рассматриваемому прибору синхронное

управление не имеет ощутимых преимуществ перед асинхронным. Устройство управления анализатора состоит из блока центрального управления и блоков местного управления — УУ арифметического устройства и УУ блока памяти.

В анализаторе используется двухадресная система кодирования команд, поскольку путем сравнительной оценки программы гармонического анализа при одно- двух- и трех-адресных командах было установлено, что самой экономичной из них является двухадресная система. Кроме того, двухадресная система кодирования команд дает наилучшее согласование длины команды и длины слова, принятой в анализаторе. Длина команды — 22 двоичных разряда. Четыре старшие разряда отведены под код операции, что дает возможность использовать 16 операций, 9 следующих разрядов заняты под первый адрес, и 9 оставшихся — под второй.

Прибор может работать в трех режимах, задаваемых с пульта управления.

1. Анализатор работает от внутреннего генератора тактовых импульсов, следующих с частотой 20 кГц. Вычисляется или среднее поле H_0 , или амплитуда H_{mk} и начальная фаза $\phi_{ок}$ k -ой гармоники функции распределения магнитного поля $H_a(\phi)$. Полученные результаты выводятся на печать.

2. Прибор работает от генератора одиночных импульсов. В этом режиме по световой индикации на пульте управления можно проследить за ходом выполнения либо некоторой части программы, либо одной команды, код которой устанавливается на регистре блока запоминания команд тумблерами, находящимися на пульте управления.

3. Анализатор работает от внутреннего генератора тактовых импульсов. После запуска от соответствующей кнопки, расположенной на пульте управления, выполняется только одна команда, код которой набран тумблерами на регистре блока запоминания команд. По окончании выполнения заданной команды решение задачи останавливается.

Из описанных режимов работы анализатора рабочим является только первый. Второй и третий режимы используются только во время первичной наладки прибора или при выявлении и устранении сбоев в работе в процессе эксплуатации. Этим же целям служит и находящаяся на пульте управления световая индикация всех регистров и управляющих триггеров анализатора.

Результаты гармонического анализа функции $H_a(\phi)$ регистрируются при помощи специальной электроуправляемой печатающей машинки. Полученные в виде шестизначных десятичных чисел значения H_0 или H_{mk} и $\phi_{ок}$ выводятся на печать по принципу "цифра за цифрой", начиная со старшего разряда. Скорость печати — 5–8 десятичных знаков в сек.

Блок питания прибора состоит из 25 стабилизированных и 2 нестабилизированных источников постоянного напряжения следующих номиналов: +1,5 в; +60 в; -2в - 4в; -6в; -10 в; -12,5 в; -20 в; -25 в; -30 в. Предусмотрена возможность плавного регулирования выходного напряжения каждого стабилизированного источника минимально на +20%, а также скачкообразного изменения напряжения всех этих источников одновременно на

+20%. Стабильность выходных напряжений составляет $\approx 1\%$. Амплитуда пульсаций $U_{\text{вых}}$ при номинальных нагрузках равна $10 \div 50$ мв. Работа блока питания контролируется с пульта управления машиной по показаниям многопредельного вольтметра и амперметра, которые с помощью переключателя можно подключить на выход любого из источников блока питания.

Все блоки анализатора гармоник выполнены полностью на полупроводниковых приборах. Габаритные размеры прибора $180 \times 180 \times 50$ см. Мощность, потребляемая от сети 220 в - $750 \div 1000$ вт.

На рис. 2 показано конструктивное оформление анализатора.

Л и т е р а т у р а

1. М.А. Гашев и др. Релятивистский циклотрон на энергию 700 Мэв. Труды международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963. Атомиздат, 1964.
2. М.Г. Серебрянников. Гармонический анализ. Гостехиздат, 1948.
3. Э. Бут, К. Бут. Арифметические цифровые машины. ИЛ, 1959.
4. В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян. Моделирование магнитного поля релятивистского циклотрона с пространственной вариацией на энергию протонов 700 Мэв. Препринт ОИЯИ, 1432, Дубна, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 ноября 1966 г.

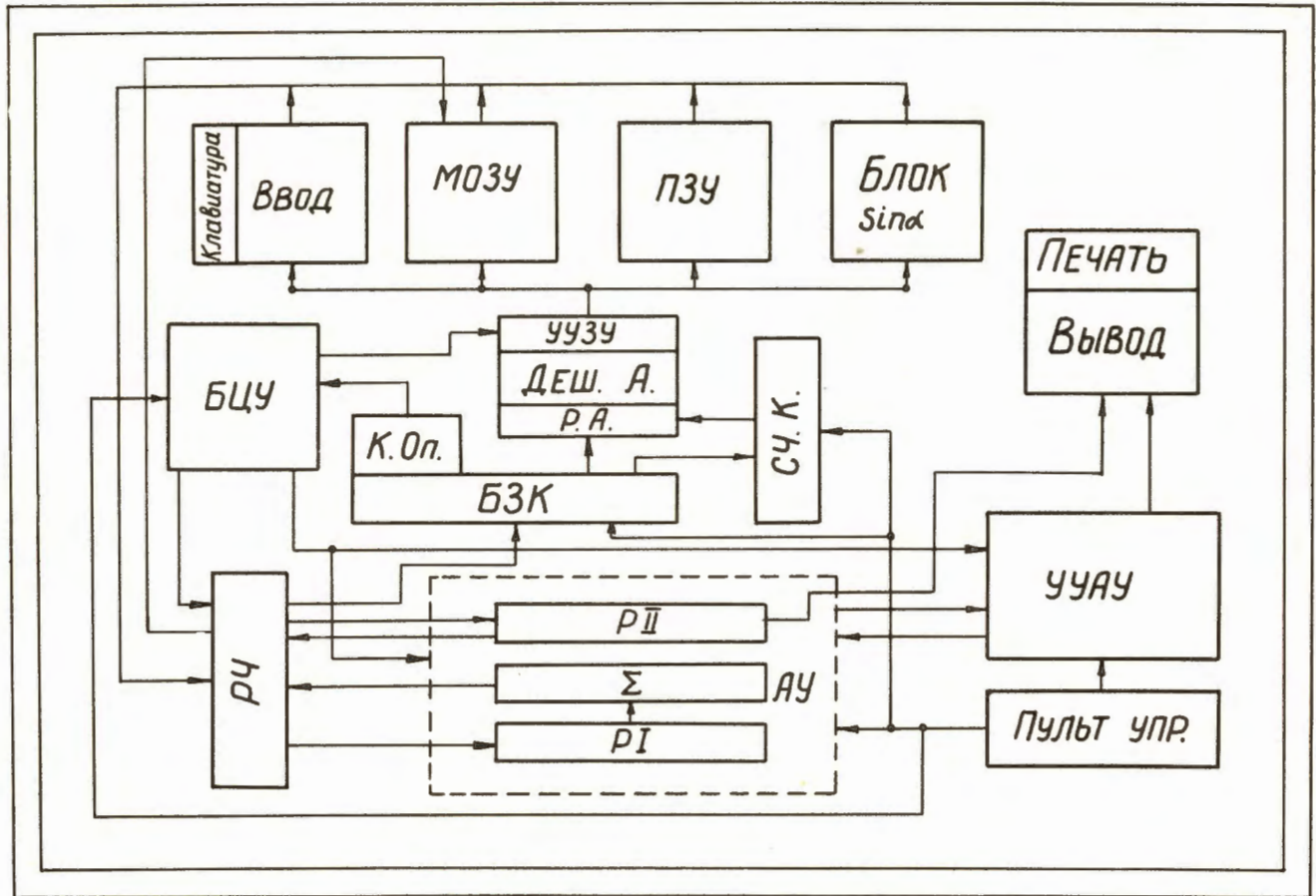


Рис. 1

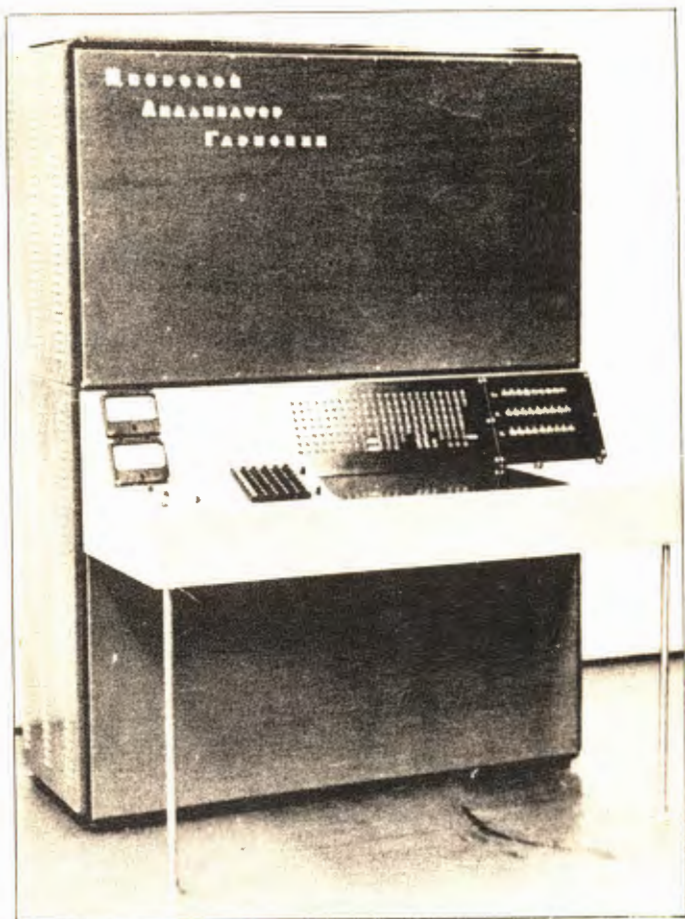


Рис. 2