

Л-312



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

3913 / 2 - 79

1/10-79

P9 - 12442

В.М.Лачинов, В.К.Маковеев, Н.В.Клоков

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГРАДИЕНТОВ
ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В КОМБИНИРОВАННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ
ПРОТОТИПА КУТИ

1979

P9 - 12442

В.М.Лачинов, В.К.Маковеев, Н.В.Клоков

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГРАДИЕНТОВ
ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В КОМБИНИРОВАННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ
ПРОТОТИПА КУТИ

Направлено в ПТЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Лачинов В.М., Маковеев В.К., Клоков Н.В. Р9 - 12442

Аппаратура для измерения градиентов импульсных магнитных полей в комбинированной ускоряющей системе прототипа КУТИ

Рассмотрена магнитометрическая аппаратура, разработанная в ОНМУ ОИЯИ, для измерения импульсных магнитных полей в комбинированной ускоряющей системе прототипа КУТИ, включающей два соленоида со спадающим полем и индукционную ускоряющую систему. Общая длина системы ~3,5 м. Осуществлен градиентный измерительный канал на базе двух обычных каналов магнитометра типа МИХ-2М. Увеличена на порядок точность измерения градиентов полей по сравнению с одноканальным способом. Достигнуто разрешение по градиенту ~ 10^{-4} Т/см в полях до 2 Т. Приведены схема и параметры устройства для автоматизированного привода пробника магнитометра при измерениях в ускорителе.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Lachinov V.M., Makoveev V.K., Klokov N.V. P9 - 12442

Equipment for Measuring Pulsed Magnetic Fields in a Combined Accelerating for the Heavy Ion Collective Accelerator Prototype

The technique and equipment for measuring pulsed magnetic fields in a combined accelerating system for the heavy ion collective accelerator prototype are considered. The system consists of two decreasing field solenoids and the induction accelerating section. Total system length equals approx. 3.5 m. The gradient measuring channel is made on the base of two channel magnetometers. For measuring the field gradient the accuracy is risen about ten times with respect to that of one channel measuring mode. The gradient sensitivity is about 10^{-4} T/cm in magnetic fields up to 2 T. The scheme and some characteristics of the automatized mapper system in use at the accelerator measurements are described.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Перед проведением экспериментов по индукционному ускорению электрон-ионных колец в прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов /КУТИ/ в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ были проведены измерения и коррекция магнитных полей в комбинированной ускоряющей системе /КУС/ прототипа КУТИ^{1,2/}.

Исследуемая магнитная система включает в себя /рис. 3/ магнитные катушки компрессора электронных колец, два соленоида для предварительного ускорения колец в спадающем магнитном поле и 36 магнитных катушек индукционной ускоряющей секции /ИУС/^{2/}. В этой магнитной системе необходимо измерить распределение градиента $\partial B_z / \partial z$ импульсного поля в моменты времени прохождения по тракту ускорения электрон-ионных колец. Это распределение определяет возможность и эффективность ускорения колец в КУС. Допустимые градиенты импульсных магнитных полей в ускорительном тракте не должны превышать ~ $50 \cdot 10^{-4}$ Т/см при уровнях полей до ~ /1,5; 2,0/ Т. Кроме того, для выбора рабочего режима всех составных частей КУС необходимо измерение распределения B_z во всем тракте, а также выявление азимутальных неоднородностей магнитного поля в ряде областей тракта. Полная длина тракта ускорения равна ~ 3,5 м, радиус ускоряемого кольца - ~ 40 мм.

Ниже рассмотрена аппаратура, с помощью которой измерялись магнитные характеристики КУС, особое внимание обращено на описание впервые реализованного градиентного канала магнитометра МИХ-2М и устройства привода его пробника в КУС.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Измерения мгновенных значений импульсных магнитных полей в системах прототипа КУТИ проводились ранее с помощью одного из двух обычных каналов импульсного магнитометра типа МИХ с соответствующими устройствами привода пробников^{/3,4/}. В этих измерениях точность определения полей и в особенности их градиентов ухудшалась из-за нестабильности /до ~1%/ источников питания и погрешностей в механической установке датчиков, из-за ограниченности разрядов /1024 кан./ регистрирующих аналого-цифровых преобразователей /АЦП/ и других причин, характерных для небалансных измерителей.

Наличие двух идентичных стабильных измерительных каналов в МИХ-2^{/5/}, введение усовершенствований в его схему^{/6/} позволили в данной работе успешно реализовать градиентный измерительный канал /ГИК/. ГИК обеспечил точности измерений градиентов на порядок более высокими, чем это было возможно с отдельными обычными каналами. При этом упрощаются также требования к точностям механического привода пробника.

а. Градиентный канал магнитометра

На рис. 1 показана блок-схема магнитометра МИХ-2М с каналом для измерения мгновенных значений градиентов магнитных полей. Параметры основных измерительных каналов магнитометра и его модернизация рассмотрены ранее^{/5,6/}.

Пробник для ГИК включает два датчика Холла /ДХ/ типа ДХ602 со специальной укладкой подводящих проводников в области ДХ для минимизации индукционных наводок^{/5/}. ДХ смонтированы внутри кубиков из плексигласа и крепятся в полостях основания пробника таким образом, что плоскость ДХ с точностью до долей градуса располагается либо параллельно, либо перпендикулярно опорной плоскости основания пробника. В первом случае измеряются поперечные относительно основания пробника составляющие магнитного поля, а во втором - продольные. Расстояние между чувствительными областями ДХ сделано равным 10 мм с точностью лучше 1%. Входные и выходные под-

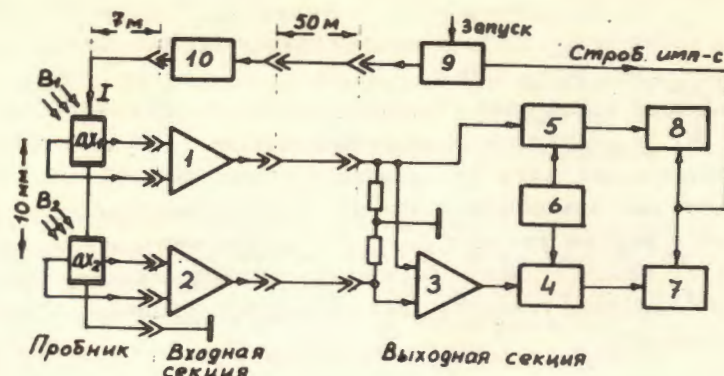


Рис. 1. Блок-схема магнитометра МИХ-2М с градиентным измерительным каналом /ГИК/. 1,2 - входные усилители, 3 - градиентный усилитель, 4-5 - выходные усилители с ШЗООС, 6 - источник опорного напряжения, 7,8 - АЦП, 9 - блок управления, 10 - источник импульсного питания ДХ.

воды к ДХ попарно бифилярно скручены и помещены внутрь экранирующих медных оплеток, которые, в свою очередь, защищены хлорвиниловой трубкой с внешним диаметром ~7 мм. ДХ и выходной кабель в пробнике закреплены отдельными крышками. Корпус пробника выполнен из эбонита и имеет размеры 12x22x70 мм. Длина кабеля между пробником и входной секцией магнитометра достигает ~7 м.

По входам /рис. 1/ ДХ₁ и ДХ₂ включены последовательно и питаются импульсным /~4 мкс/ стабильным /~10⁻⁴/ током ~1 А. Такое включение ДХ способствует повышению точности измерения градиентов полей. Возможно и раздельное питание датчиков. Источник тока /10/ возбуждается дистанционно /до 50 м/ по общему сигналу запуска от блока управления /9/, расположенного в выходной секции магнитометра.

С выходов ДХ₁ и ДХ₂ сигналы, соответствующие приложенным полям В₁ и В₂, поступают на дифференциальные входы усилителей 1 и 2. Эти усилители сбалансированы и не чувствуют синфазный входной сигнал, а разностный сигнал усиливают и выдают его на выходе относительно шины земли в виде импульса напряжения. Одинаковая чувствительность по полю каждого измерительного канала обеспечивается коррекцией коэффициен-

тов усиления $K_{вх}$, которые для разных диапазонов поля равны 2, 4, 10, 20, 40. Кроме того, применены различные схемные меры, а также термостабилизация усилителей, чтобы обеспечить высокую стабильность ГИК.

С выходов усилителей /1,2/ измеряемые сигналы по кабелям длиной 50 м поступают в выходную секцию магнитометра на дифференциальный вход градиентного усилителя /3/. Разность этих сигналов, зависящая от градиента поля, выделяется и усиливается в первом каскаде /рис. 2, M1/ градиентного усилителя, а затем дополнительно усиливается во втором каскаде /M2/. Общий коэффициент усиления этих каскадов устанавливается равным 2,4 или 10.

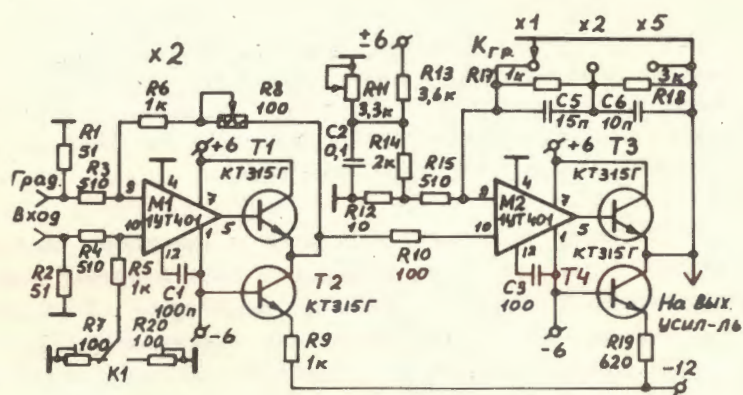


Рис. 2. Принципиальная схема градиентного усилителя.

Далее сигнал градиента поступает в выходной усилитель /рис. 1, поз. 4/ с широкополосной задержанной на время длительности импульса отрицательной обратной связью /ШЗООС/ /8/. Функции выходного усилителя весьма важны для обеспечения высокой точности регистрации градиентов. Во-первых, практически полностью устраняется влияние дрейфа выходных напряжений от разных причин в усилителях. Во-вторых, с помощью регулируемого опорного источника напряжения /5/ можно задавать на выходе усилителя, а следовательно, и на входе регистрирующего АЦП, любой исходный уровень напряжения в диапазоне ± 5 В, что дает дополнительные функциональные возможности при работе. Наконец, в усилителе происходит эф-

фективное подавление наводок от измеряемых полей и от силовой сети 50 Гц. Так, наводки с частотой ~ 1 кГц и 50 Гц, обычные при работе КУТИ, подавляются, соответственно, в ~ 200 и 1000 раз. При этом на градиентный импульсный сигнал ШЗООС не действует, и он дополнительно усиливается в 3 раза, что обеспечивает общее усиление градиентного сигнала ($K_{гр}$) равным 6, 12 или 30.

Регистрация градиентного сигнала осуществляется в АЦП /7/, имеющем 1024 канала. Момент измерения амплитуды сигнала определяется стробирующим импульсом с длительностью 1 мкс, вырабатываемым блоком управления /9/. Этот момент соответствует конечной части измеряемого импульса.

Поскольку диапазон уровней магнитных полей, при которых измеряются градиенты полей в прототипе КУТИ, весьма широк /до ~ 2 Т/, существенное влияние на точность определения градиентов полей оказывают нелинейности характеристик элементов ГИК, таких, как датчики Холла, усилители, АЦП. В основных каналах МИХ-2М эти нелинейности учитываются в градуировочных таблицах.

Балансная структура ГИК позволяет снизить влияние нелинейностей ДХ и усилителей, существующих в основных каналах, так как они близки по форме и величине. Наиболее серьезная нелинейность характеристики используемого АЦП в начале диапазона исключается выбором исходного рабочего уровня в середине выходного динамического диапазона / ~ 500 каналов/ посредством выбора соответствующего опорного напряжения в выходном усилителе. В этом случае к тому же удобно регистрировать градиенты как положительной, так и отрицательной полярности. Однако, чтобы практически устранить влияние всех оставшихся нелинейностей, проведена общая калибровка градиентного канала на магнитном стенде, с использованием ЯМР-магнитометра и обоих основных каналов магнитометра МИХ-2М.

Градиент магнитного поля определяется по формуле:

$$\Delta B = K(N - N_0), \quad /1/$$

где ΔB - измеряемый градиент магнитного поля в единицах 10^{-4} Т/см, что соответствует разности полей в центрах двух ДХ, расстояние между которыми равно 10 мм; K - коэффициент

пропорциональности, который определяется комбинацией выбранных коэффициентов усиления в ГИК и уточняется при калибровке; N - число каналов АЦП, соответствующее измеряемому градиенту; N_0 - число каналов АЦП, соответствующее нулевому градиенту, которое задается равным 536 каналам в отсутствие внешнего поля, а при наличии поля и выбранного поддиапазона уточняется по калибровочным кривым.

Всего в магнитометре возможны при уровнях полей до $\sim 2,2$ Т 15 поддиапазонов для измерения градиентов в пределах до $\pm 0,24 \div 0,2$ Т/см, т.к. $K_{ВХ}$ имеет пять значений, а $K_{ГР}$ - три. Для измерений в КУС использовались два значения $K_{ВХ}$ - 2 и 10, что соответствовало максимальным уровням поля 2,2 Т и 0,5 Т. При этом ключом $K1$ /рис. 2/ соответственно корректировался баланс входного градиентного каскада.

В результате калибровки были определены значения K и диапазоны измеряемых градиентов /см. табл. 1/, а также калибровочные кривые для величины N_0 в зависимости от выбранных коэффициентов усиления $K_{ВХ}$ и $K_{ГР}$. Кроме того, на магнитном стенде проведена проверка относительной точности регистрации по ГИК для наиболее чувствительных поддиапазонов при градиентах, близких к предельным значениям. Для более 100 измерений в течение 15 мин относительная точность регистрации была лучше 1%.

Таблица 1

$K_{ВХ}$	$K_{ГР}$	K	$\Delta B_{\text{макс}} \cdot 10^{-4}$ Т/см
2	6	4,98	+2400 ÷ -2000
2	12	2,40	+1150 ÷ -1000
2	30	1,02	+490 ÷ -410
10	6	1,236	+600 ÷ -500
10	12	0,606	+290 ÷ -240
10	30	0,246	+120 ÷ -100

Магнитные измерения на КУС предполагают одновременно с регистрацией градиентов поля измерять и уровни полей с помощью одного из основных измерительных каналов. На рис. 1 представлен этот канал. Сигнал с выходного усилителя /1/ поступает на вход усилителя /5/ с ШЗООС и далее на регистрирующий АЦП /8/. Смещение на входе АЦП аналогично задается с помощью регулируемого источника опорного напряжения /6/. Точность регистрации магнитного поля в этом канале лучше 10^{-3} .

б. Устройство привода пробника

Для перемещения пробника магнитометра вдоль оси компрессора и КУС создано специальное устройство привода /рис. 3/, чтобы удовлетворить ряду требований. Во-первых, необходимо перемещать пробник на радиусе, равном радиусу сжатого электронного кольца ~ 40 мм, внутри трубы с диаметром 120 мм на длине $\sim 3,5$ м с возможностью вращения пробника относительно оси КУС. При этом должна обеспечиваться сравнительно высокая точность перемещения пробника и определения его положения. Во-вторых, часть системы привода, находящаяся внутри КУС, не должна иметь металлических деталей, которые могли бы исказить измеряемые магнитные поля и градиенты. Наконец, это устройство должно иметь дистанционное автоматическое управление положением пробника по оси z . Перемещение пробника по азимуту допустимо вручную из-за ограниченной потребности в этой операции.

Рассмотренное ниже устройство привода /рис. 3/ в основном удовлетворило эти требования. Оно включает базовую винипластовую трубу /21/, которая располагается внутри КУС соосно с ней. Один конец трубы через упорный подшипник /23/ крепится в юстировочном устройстве /22/ на стене за компрессором, а другой вместе с корпусом приводного механизма /15/ через упорный подшипник /5/ и винт /2/ с гайкой /3/ крепится в юстировочном устройстве /4/, установленном на специальной укрепленной опоре /1/. На винте /2/ установлен диск с лимбом /5/, по которому определяется азимутальное положение трубы с кареткой и пробником. С помощью винтовой пары /2,3/ произво-

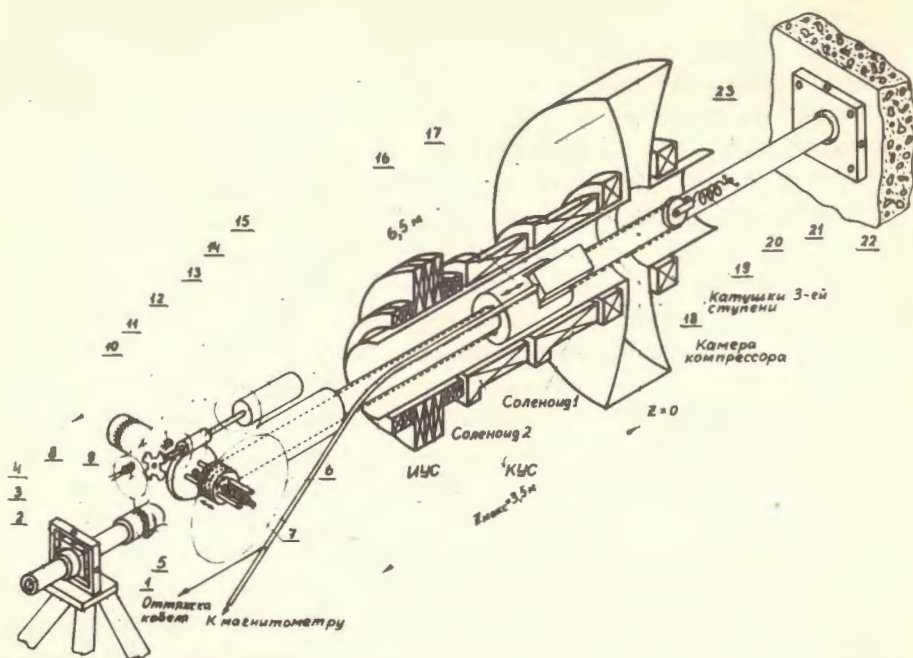


Рис. 3. Кинематическая схема привода пробника в КУС.

дятся натяженне базовой трубы с усилием до ~ 1 т, чтобы обеспечить ее прямолинейность. Каретка /16/ с пробником /17/ перемещается вдоль трубы на подпружиненных подшипниках скольжения под действием усилия, передаваемого вольфрамовой проволокой /18/ через барабан /6/ от мотора /14/. Механизмы, связанные с барабаном и мотором, смонтированы в корпусе /15/, который скреплен с левым концом трубы. Оба конца проволоки намотаны на барабан, причем направление намотки противоположное. С другой стороны трубы проволоочная петля проходит через ролик /19/, который подтягивается пружиной /20/ к концу трубы. При вращении барабана одна ветвь проволоки наматывается на него, а другая сматывается, и прикрепленная к проволоке каретка перемещается. Чтобы при этом не возникало перекоса проволоки у барабана, последний принудительно смещается при вращении с помощью резьбового соединения с винтом /7/. При этом барабан скользит по штифтам, запрес-

сованным в червячное колесо /13/, соединенное с лимбом /8/ для местного контроля положения пробника по оси z. Червячное колесо приводится во вращение от червяка /12/, соединенного с валом электродвигателя /14/ с одной стороны и с валом фотодатчика оборотов с другой. В состав фотодатчика входит диск с прорезями /10/, лампочка /11/ и фототриазистор /9/. Мотор, фотодатчик и два концевых переключателя подключены к электронной схеме, которая рассмотрена в /4/. Эта автоматическая система позволяет дистанционно управлять положением пробника магнитометра вдоль оси z.

Перед измерениями производится юстировка всего устройства с привязкой к специальным меткам системы КУС - компрессор. При этом используется сквозное отверстие по оси устройства.

Основные данные устройства привода:

- | | |
|--|--------------|
| 1. Длина всего устройства | 6,5 м |
| 2. Рабочий диапазон перемещения пробника по оси z | 3,5 м |
| 3. Точность перемещения по оси z | $\pm 0,1$ мм |
| 4. Диапазон перемещения пробника по азимуту | 0-360° |
| 5. Расстояние центра пробника от оси | 40 мм |
| 6. Точность положения центра пробника по радиусу относительно оси КУС во всем диапазоне по z | $\pm 1,2$ мм |
| 7. Время полного прохождения пробником рабочего диапазона по z | 18 мин. |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная выше аппаратура была успешно использована при измерениях и коррекции распределения импульсного магнитного поля и его градиентов вдоль оси z в КУС прототипа КУТИ. Измерения производились в моменты времени, соответствующие максимальным значениям полей и рабочему положению электрон-ионного кольца в тракте ускорения.

В качестве примера представлено измеренное распределение поля и его градиента в ускоряющих соленоидах /рис. 4/ и в ИУС /рис. 5/. Измерения в них проводились при разных

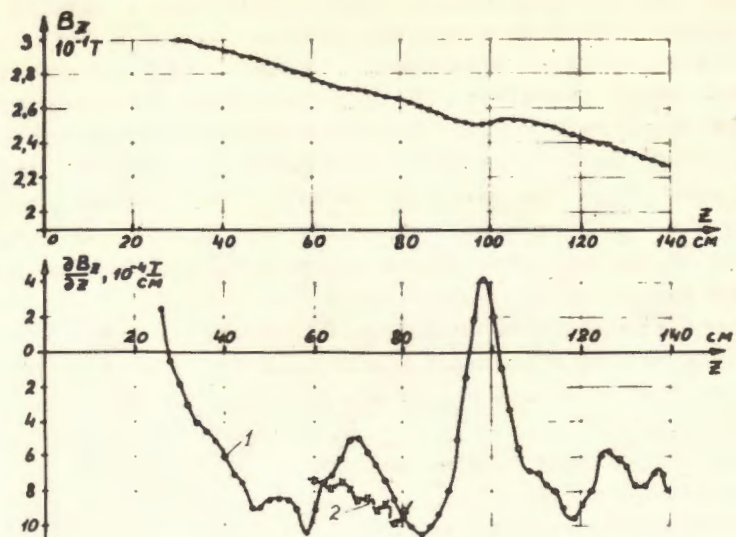


Рис. 4. Измеренное распределение магнитного поля и градиента в ускоряющих соленоидах.

уровнях магнитных полей. Положение датчиков при измерениях соответствовало азимуту 0 / верхнее положение относительно оси КУС/, хотя при $z \approx 60-80$ см проводились измерения на азимуте -180° /рис. 4, кривая 2/, где было замечено влияние близко расположенных подводов.

Проведенные измерения показали высокую эффективность ГИК, его хорошую помехозащищенность и стабильность работы, которая по грубой оценке достигает $\sim 10^{-4}$. Оценка относительной точности градиентного канала по некоторым результатам измерений при нестабильности питания $\sim 0,25\%$ в поле $-0,3$ Т при градиенте $-12 \cdot 10^{-4}$ Т/см по 10 отсчетам давала среднеквадратичные отклонения $0,5 \cdot 10^{-4}$ Т/см, что согласуется с полученной на стенде оценкой точности регистрации градиента. Таким образом, разрешающая способность в измерениях градиентов $\sim 10^{-4}$ Т/см при высоких уровнях импульсных полей до ~ 2 Т показывает, что с созданием ГИК на порядок улучшились возможности магнитометра МИХ-2М в измерениях величины градиентов импульсных и стационарных магнитных полей. Это расширяет круг применения магнитометра. Так,

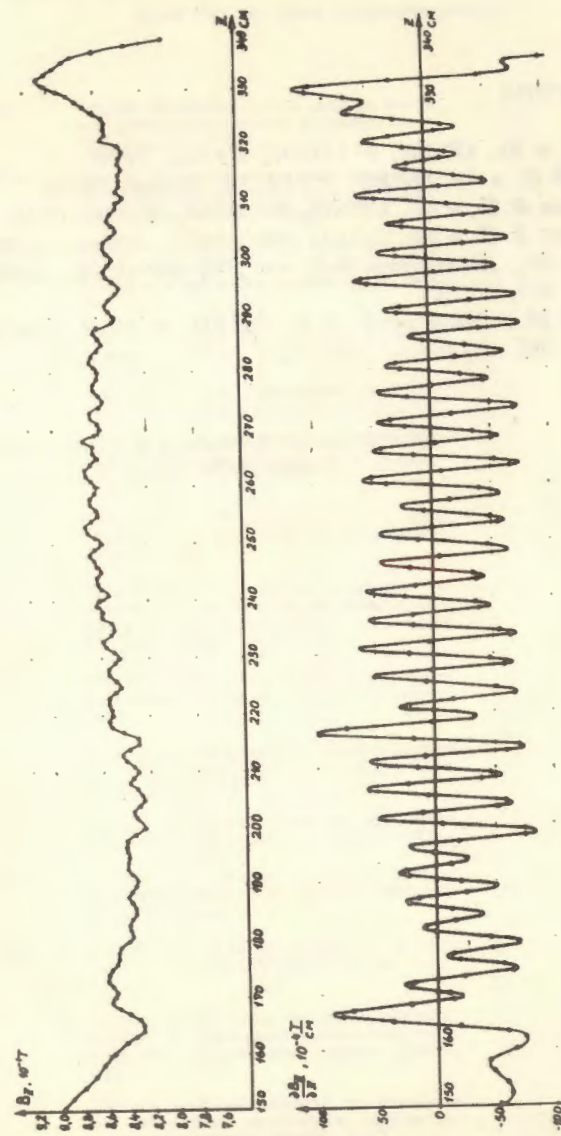


Рис. 5. Измеренное распределение магнитного поля и градиента в индукционной ускоряющей секции /ИУС/.

например, позднее он использовался при измерениях распределения градиентов магнитных полей в компрессоре и при определении параметров сжатого электронного кольца в прототипе КУТИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев В.И. и др. ОИЯИ, 9-11007, Дубна, 1978.
2. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, 9,-12124, Дубна, 1979.
3. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-8753, Дубна, 1975.
4. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-11663, Дубна, 1978.
5. Лачинов В.М., Маковеев В.К. ОИЯИ, Р9-8118, Дубна, 1974; ПТЭ, 1975, №3, с.170.
6. Лачинов В.М., Маковеев В.К. ОИЯИ, 9-9899, Дубна, 1976; ПТЭ, 1977, №5, с.149.

*Рукопись поступила в издательский отдел
4 мая 1979 года.*