

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

5259/2-80

3/4-80

P9-80-595

М.А.Воеводин, В.И.Волков, Л.П.Зиновьев,
А.Д.Коваленко, Н.А.Коруков, И.И.Куликов,
Ш.Э.Сайфулин, Ю.И.Тихомиров

ОПЕРАТИВНАЯ СИСТЕМА
ПРЕЦИЗИОННОЙ МАГНИТОМЕТРИИ ДИПОЛЕЙ
И ЛИНЗ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

1980

Разработка в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ сверхпроводящих магнитов в рамках программы нуклотрона - сверхпроводящего синхротрона релятивистских ядер /1/ потребовала создания оперативной системы магнитометрии, обеспечивающей высокую точность измерений относительной неоднородности поля в апертуре магнитов, а также экспериментального определения эффективной их длины и ряда других параметров, необходимых для выбора оптимальной конструкции магнита.

Поставленным требованиям с точки зрения методики измерений наиболее соответствует метод гармонического анализа с использованием индукционных преобразователей величины магнитной индукции в электрический сигнал /2/, который дает возможность:

1. Проводить измерения в широком диапазоне температур, вплоть до температуры жидкого гелия без нарушения линейности преобразования.

2. Определять топографию магнитного поля посредством только поворота преобразователя вокруг оси и при минимальном количестве исходной информации.

3. Непосредственно получать значения производных $\partial^n B_x / \partial x^n$, $\partial^n B_y / \partial x^n$, необходимые при расчетах динамики частиц.

Преимущества этой методики особенно очевидны при работе измерительной аппаратуры на линии с ЭВМ.

Исходными данными для получения требуемой конечной информации о характеристиках магнитного поля магнита в одном цикле измерений являются несколько наборов сигналов, соответствующих значениям магнитного потока на фиксированном радиусе в равнорасположенных по азимуту N точках в пределах полного оборота.

Практическая реализация указанной магнитометрической системы потребовала решения ряда методических вопросов, связанных, главным образом, с обеспечением высокой точности измерений, разработкой комплекса измерительной и управляющей электронной аппаратуры, источников питания магнитных элементов, изготовлением высокоточных механических приспособлений, наборов индукционных преобразователей /ИП/ и устройств для их калибровки, разработкой программного обеспечения, аппаратуры сопряжения с ЭВМ и рядом других вопросов.

Общий вид аппаратуры стенда показан на рис.1. На переднем плане видны устройства, предназначенные для калибровки гармонических индукционных преобразователей, образцовая магнитная

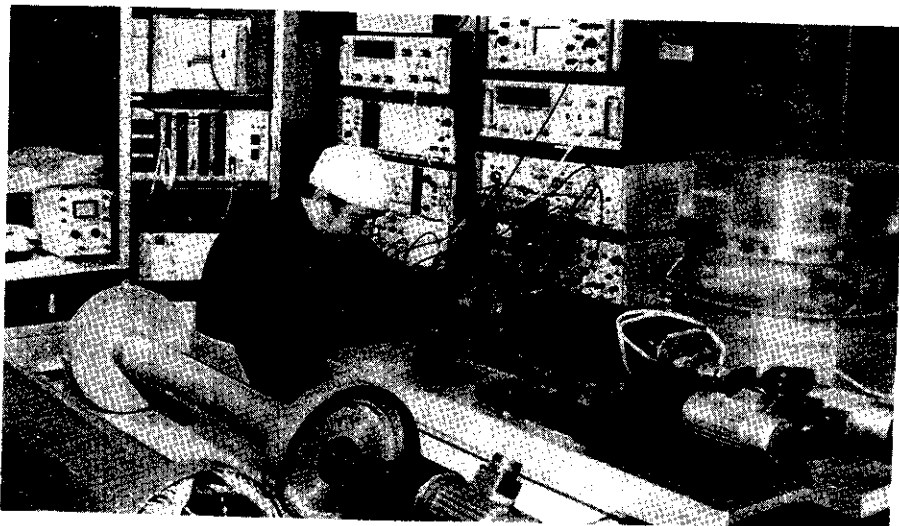


Рис.1. Общий вид стенда.

мера, используемая, в частности, для проверки линейности измерительной электроники, жесткая платформа, на которой юстируются и фиксируются исследуемый магнит, индукционный преобразователь и шаговый двигатель /ШД/ с редуктором, измерительная и управляющая электроника.

I. ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Блок-схема стенда показана на рис.2. Исследуемый магнит /МЭ/ запитывается импульсным током с крутизной нарастания 2 кА/с с частотой $0,1 \text{ Гц}$ от источника питания /ПМЭ/. Величина тока питания может регулироваться в пределах от 20 до 180 А посредством изменения амплитуды зарядного напряжения накопительной емкости ПМЭ. Сигнал контроля величины тока снимается с шунта /Ш/, и через блок аналоговой памяти /АП/ подается на коммутатор /К/. При этом мгновенная величина тока возбуждения МЭ определяется с относительной погрешностью не более $2 \cdot 10^{-4}$.

2. Вращение ИП с требуемым при измерениях шагом осуществляется автоматически шаговым двигателем /ШД/ типа ШД-5Д, имеющим единичный угол поворота $1,5^\circ$; через планетарный редуктор с коэффициентом редукции $1:1630$, что обеспечивает точность установки ИП по углу на каждом шаге не хуже 10^{-4} рад. /возможен также поворот ИП "вручную" с отсчетом угла по лимбу

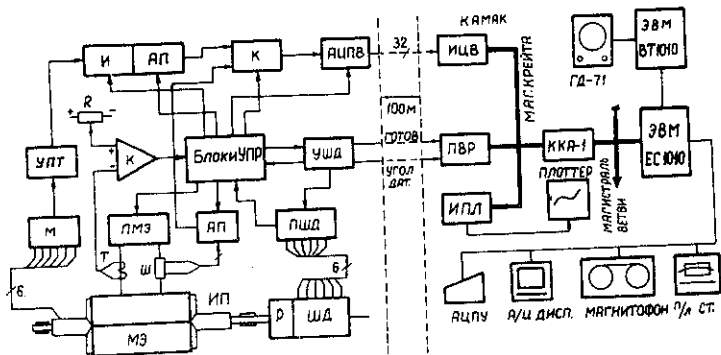


Рис. 2. Блок-схема стенда.

с точностью $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ рад./с. Питание шагового двигателя производится по двенадцатитактной схеме переключения ^{/3/}, от блока ПШД, управляемого от схемы УШД, вырабатывающей серию команд на разовые повороты ШД и команду на разрешение считывания информации. Длительность серии определяется оператором до начала цикла измерений исходя из требуемого шага поворота ИП. Последовательное угловое перемещение ИП в пределах полного оборота, считывание необходимой информации и передача в блоки "КАМАК", связанные с ЭВМ, осуществляются автоматически. При этом блоки управления контролируют наличие тока в МЭ на каждом шаге измерений, и в случае его отсутствия задерживают команду на считывание и на очередной поворот ИП.

3. В качестве индукционных преобразователей могут быть в принципе использованы любые типы индукционных катушек /ИК/, описанные, например, в ^{/4/}.

Для получения необходимых характеристик магнитного поля МЭ в одном цикле измерений удобно использовать размещенные на одном каркасе две пары ИК, таких, чтобы продольная длина одной пары была больше продольной длины магнитного элемента, а длина другой пары - существенно меньше, и чтобы при противофазном взаимном включении катушек каждой пары осуществлялось значительное подавление чувствительности к основной гармонике поля МЭ.

Был изготовлен ряд ИК, чувствительных к азимутальной составляющей поля и предназначенных, в частности, для исследования МП в сверхпроводящих дипольных магнитах типа "Оконная рама" ^{/5/}.

Чувствительность ИК к гармоникам магнитного поля определялась на основании данных калибровки и последующего расчета ^{/6/},

при этом обеспечивалась точность порядка нескольких процентов вплоть до $n=17$.

Катушки подсоединялись через коммутатор к электрической мостовой схеме. Коммутатор позволяет либо включать катушки каждой пары встречно, либо выводить сигнал только с одной /основной/ ИК. Использование мостовой балансной схемы в сочетании с высокой степенью идентичности катушек пары, достигнутой при изготовлении, дало возможность осуществить подавление 55 дБ чувствительности к дипольной составляющей МП.

II. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

1. С целью расширения возможностей измерения нелинейностей МП, без потери точности в сторону малых индукций /что необходимо, например, при исследовании сверхпроводящих магнитов в теплом варианте/ предусмотрен канал предварительного усиления сигнала с ИП, который имеет уровень собственных шумов ~ 1 мкВ в полосе частот $10^{-2} \div 10$ Гц, температурный дрейф 3 мкВ/К и коэффициент усиления ~ 50 .

2. Интегратор и схема аналоговой памяти /И, АП/ изготовлены на базе управляемого прецизионного усилителя с автоматической подстройкой нуля прерыванием входного сигнала. Основные характеристики усилителя следующие:

Коэффициент передачи по постоянному току	- 10^7
Полоса частот при единичном усилении	- 2,5 МГц.
Быстродействие	- 30 В/мкс.
Шумы в полосе частот /0,01...1/ Гц	- 1 мкВ.
Температурный дрейф напряжения	- 0,3 мкВ/К.

Внешние цепи интегратора включают в себя высокоточные элементы. Постоянная времени цепи обратной связи $\tau = 10^{-2}$ с. Ошибка интегрирования импульсов длительностью 30 мс не превышает 10^{-6} .

После операции интегрирования схема входит в режим хранения информации, длящийся 3 с. В течение этого времени АЦП вольтметра Ц1513 через коммутатор /К/ поочередно подключается к интегратору и к схеме измерения амплитуды импульса тока, возбуждаемого МЭ.

III. СОПРЯЖЕНИЕ С ЭВМ

Управляющая и регулирующая электроника работает на линии с двухмашинным комплексом на базе ЭВМ ЕС-1010 /64 Кбайтов/ с набором внешних устройств /телетайп, диск с фиксированной

головкой емкостью 800 Кбайтов, 2 магнитофона, перфоленточная станция, АЦПУ, графопостроитель/ и ЭВМ ВТ 1010Б /16 Кбайтов/, являющейся процессором графического дисплея - ГД-71⁷⁷. Аппаратура сопряжения выполнена в стандарте КАМАК и подключена к ЭВМ ЕС-1010 через разработанный в Лаборатории высоких энергий универсальный драйвер ветви /УДВ/ ⁷⁸/.

Для передачи информации на ЭВМ, расположенной в 70 метрах от стенда, используется передача сигнала в коде 2-4-2-1 с выхода АЦП вольтметра Щ1513. Преобразование кода и согласование уровней происходят в блоке интерфейса вольтметра. В блок ПВР поступает также команда "Готов" и информация об угловой координате измерительной катушки.

IV. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

На рис.3 приведена блок-схема программы приема, обработки и представления информации. Основная программа включает в себя ряд программ, написанных на фортране и ассемблере, и предусматривает работу в режиме диалога оператор - ЭВМ. После загрузки программы с диска в память и ее запуска ЭВМ входит в режим диалога, в котором задаются следующие параметры:

- MA . ET - тип исследуемого МЭ /5 символов/,
- CT - тип ИП /7 символов/,
- BI - амплитуда основной гармоники в Гс,
- I - нормированное значение тока питания МЭ в А,
- RAP - радиус апертуры МЭ в мм,
- FLAG - признак типа ИП,
- DU, DPHI - максимальные величины нестабильности выходных сигналов напряжения с ИП и погрешности в установке угла ИП,
- MA - количество гармоник, подлежащих расчету ($MA \leq (N-1)/2$),
- SCS, SCV - масштаб по горизонтальной и вертикальной осям при графическом построении зависимостей,
- JØ - угол, соответствующий плоскости вычисления суммарной нелинейности,
- L1 - количество точек расчета по γ ,
- J2 - шаг расчета по ϕ ,
- L2 - шаг изменения индекса по γ .

После задания всех диалоговых параметров производится печать постоянных параметров программы и затем вызывается подпрограмма (SMMIN), принимающая информацию в режиме на линии. Завершив цикл измерений /в данном случае набрав 36 пар значений, первое из которых несет информацию о токе питания МЭ, а второе - проинтегрированный сигнал с ИП/, SMMIN дает команду на окончание цикла и начинается обработка полученной информации.

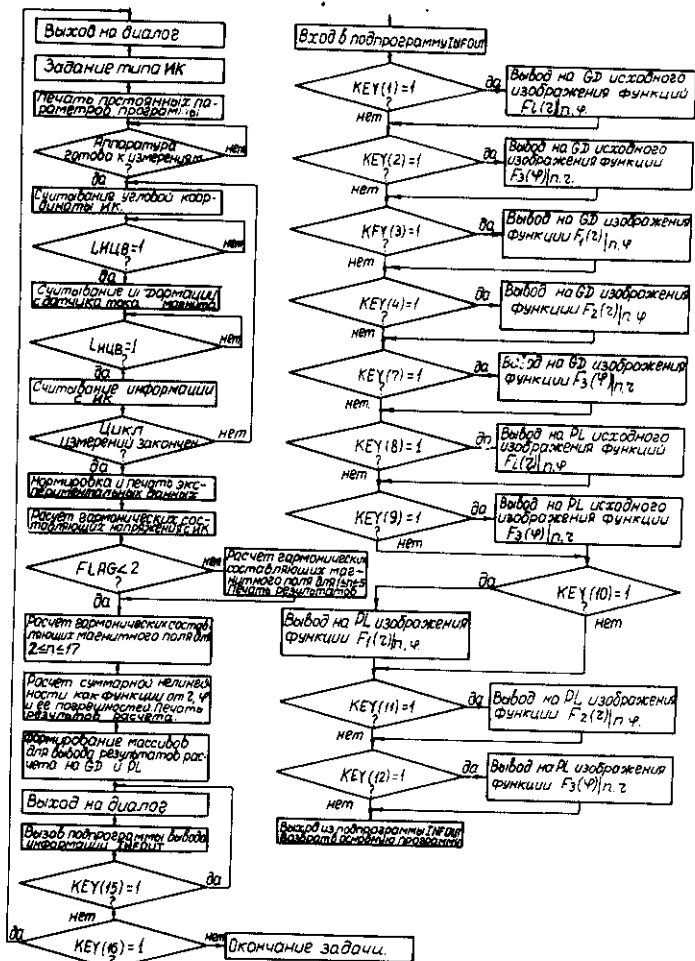


Рис.3. Блок-схема программы приема, обработки и вывода информации.

После завершения расчетов при значениях параметров, заданных в диалоге, и формирования массивов для вывода результатов на графический дисплей и графопостроитель производится печать исходных данных и рассчитанных величин гармонических составляющих магнитного поля на радиусе 0,9 полной апертуры /четных и нечетных коэффициентов, амплитуд и фаз гармоник/, суммарной нелинейности по заданному количеству гармоник на заданном азимуте в зависимости от радиуса по сумме всех и только нечетных

гармоник с указанием возможных ошибок измерения полученных величин, распечатываются также все массивы, предназначенные для визуального графического представления информации.

По окончании печати производится вызов подпрограммы вывода информации INFOUT и повторный выход на диалог.

Повторный выход на диалог удобен в том случае, когда мы заранее не знаем величину максимальной нелинейности и поэтому не можем указать в первом диалоге оптимальный масштаб по вертикали (SCV), например, или хотим осуществить повторный вывод информации при других значениях азимутальных или радиальных координат.

В подпрограмме INFOUT реализованы следующие возможности:

1. Вывод на графический дисплей /ГД/ или на графопостроитель /ГП/ зависимости от r относительной нелинейности азимутальной составляющей поля по сумме заданного количества нечетных гармоник и с графическим указанием возможных ошибок измерения $(F_1(r) |_{n,\phi})$ в диаметральной плоскости при трех значениях азимута.

2. Вывод на ГД или ГП зависимостей от r относительной нелинейности азимутальной составляющей магнитного поля по сумме всех гармоник $/2 \leq n \leq MA/$ и по сумме только нечетных из указанного диапазона значений n без указания погрешностей измерения $(F_2(r) |_{n,\phi})$ при азимутальных координатах, указанных в п.1.

3. Вывод на ГД или ГП зависимости от ϕ суммарной относительной нелинейности /в %/ полного вектора магнитного поля $V = (V_r^2 + V_\phi^2)^{1/2}$ по сумме всех гармоник до $n = MA$ включительно $(F_3(\phi) |_{n,\phi})$ на заданном радиусе.

Управление работой программы вывода информации INFOUT осуществляется по командам $KEY(M) = I(0)$, задаваемым клавишами. Перед выводом на ГД или ГП требуемой зависимости из перечисленных выше на экран ГД /или на масштабную бумагу в случае использования ГП/ выводится по клавишам $KEY(1)$, $KEY(2)$, /для ГП - $KEY(8)$, $KEY(9)$ / изображение соответствующей масштабной сетки с цифровым указанием масштабных единиц и буквенным обозначением переменных по осям координат, а также алфавитно-цифровая информация о типе исследуемого магнита, размерах апертуры в абсолютных величинах, нормированном значении тока питания магнита при измерениях, амплитуде поля основной гармоники, типе индукционного преобразователя.

По команде $KEY(16) = 1$ осуществляется выход в начало программы с тем, чтобы без проведения нового цикла измерений имелась возможность повторно обработать данные при других значениях параметров. При этом в диалоге задается признак, по

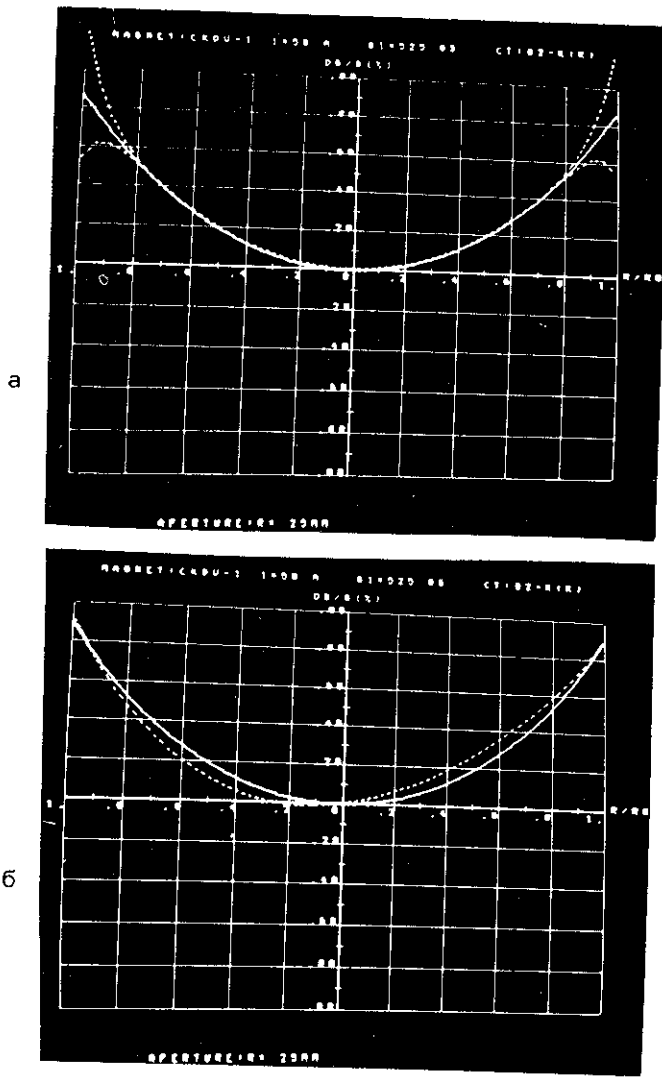


Рис.4. Представление результатов измерений на экране графического дисплея: а - относительная нелинейность поля по сумме нечетных гармоник с указанием возможной погрешности измерений /пунктир/, б - то же, но по сумме всех гармоник до $n = 15$ /пунктир/ и по сумме нечетных.

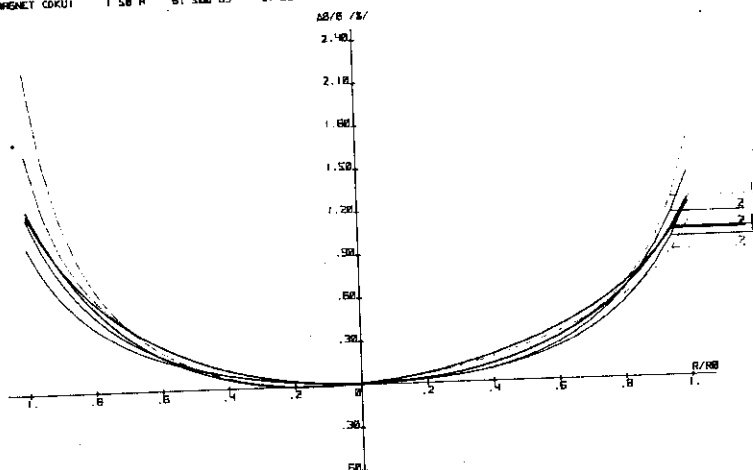


Рис.5. Представление информации с помощью графопостроителя /3 различных цикла измерений/. В каждом цикле относительная нелинейность по сумме всех и только нечетных гармоник обозначена цифрами 1 и 2.

которому либо производится новый цикл измерений, либо повторно обрабатываются имеющиеся данные.

Рис.4а,б иллюстрирует результаты исследования одного из магнитов, выведенные на экран ГД в соответствии с режимами 1 и 2 соответственно, на рис.5 для другого типа магнита показаны результаты различных циклов измерений различными ИП, изображенные на одном листе с помощью ГП.

V. ОСНОВНЫЕ ИТОГИ

1. В результате проведенных работ создана методическая и экспериментальная база для оперативного исследования характеристик магнитного поля мультипольных магнитов для ускорителей синхротронного типа и каналов транспортировки пучков. Полное время цикла измерений, включая обработку и представление информации, определяется временем полного оборота ИП внутри исследуемого магнита и составляет в автоматическом режиме ~40 мин. При этом достигается воспроизводимость результатов на уровне $1 \cdot 10^{-5}$. Точность определения суммарной относительной нелинейности поля в дипольных магнитах на радиусе ~0,9 полной

апертуры по 15 гармоникам не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ / величина абсолютной погрешности при измерении гармонических составляющих напряжения с ИП порядка ± 1 мВ вплоть до $n=15$ /. В режиме поворота ИП "вручную" цикл измерений сокращается до 10 мин., однако точность при этом снижается примерно в 5 раз.

2. Аппаратура и программное обеспечение могут быть без изменения использованы для исследования широкого спектра магнитов, как теплых, так и сверхпроводящих, при этом сменяемым элементом является только индукционный преобразователь, конструкция которого должна быть выполнена в соответствии с характерными геометрическими параметрами исследуемых магнитных элементов.

3. Созданное программное обеспечение, обладающее большой гибкостью и универсальностью, позволяет выводить конечную информацию в наиболее удобной форме. Время счета и представления информации не превышает двух минут.

В заключение авторы выражают благодарность Л.Г.Макарову за интерес к работе и поддержку, И.А.Шелаеву за конструктивные обсуждения ряда вопросов, В.Н.Кузнецову, А.А.Анашину, П.Н.Буйлову за изготовление и участие в наладке измерительной и электронной аппаратуры и других устройств стенда, а также И.Турзо за предоставленную возможность использовать интерфейс связи цифрового вольтметра Ц1513 с ЭВМ ЕС-1010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. и др. В сб.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.4.
2. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12233, Дубна, 1979.
3. Айриян В.С., Нерсисян А.Г. В сб.: Электронная техника в автоматике. "Сов. радио", 1975, вып.7, с.103.
4. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12378, Дубна, 1979.
5. Аверичев С.А. и др. ОИЯИ, Р8-11700, Дубна, 1978.
6. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-80-432, Дубна, 1980.
7. Chernykh E.V. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1977, v.NS-24, No.6, p.2561.
8. Нгуен Фук и др. ОИЯИ, 10-8712, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 сентября 1980 года.