

-11.050

Бр ¹¹⁶ 468

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 74 - 70

Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер,
А.А.Литвинов, С.П.Петров

МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ
ТОКА ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Новосибирск

1974

Е.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер,
А.А.Литвинов, С.П.Петров

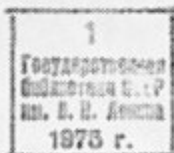
МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОКА ПУЧКА
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается устройство, измеряющее среднее значение тока пучка заряженных частиц в накопительных установках. Принцип работы устройства позволяет производить измерения как непрерывного пучка, так и пучка, состоящего из произвольного числа сгустков.

Точность измерения ограничивается магнитным шумом магнито-модуляционного датчика, который составляет 10 мкА. Диапазон измеряемых токов 100 мкА + 30 мА.

Ф8-1
11/25/81



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА

Функциональная схема прибора изображена на рис. I. Магнито-модуляционный датчик (I) представляет собой магнитный усилитель, работающий по принципу удвоения частоты. В датчик через фильтр (2) от генератора (3) подается переменный ток возбуждения частоты 3 кГц, который намагничивает пермаллоевый сердечник датчика и таким образом модулирует величину дифференциальной магнитной проницаемости μ_d сердечников с удвоенной частотой. В выходной обмотке W_c датчика появляется напряжение удвоенной частоты пропорциональное измеряемому току. Это напряжение усиливается резонансным услителем (4) и выпрямляется синхронным детектором (5). Выпрямленное напряжение усиливается услителем-интегратором (6) и подается на выход. С выхода устройства в сигнальную обмотку датчика w_c заводится обратная связь. Напряжение коммутации демодулятора формируется в схеме удвоения частоты (7).

МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫЙ ДАТЧИК

Датчик состоит из двух кольцевых сердечников, выполненных из пермаллоя. На каждом кольце равномерно намотаны по две обмотки: одна - обмотка возбуждения, другая - сигнальная. Обмотки соединяются последовательно (согласно рис. I) таким образом, что напряжения возбуждения, трансформируемые из обмоток возбуждения w_c в обмотки сигнальные w_c взаимно вычитаются. Датчик размещается на камере ускорителя. Пучок частиц, проходящий через отверстия колец, создает в них постоянное магнитное поле H_c , а так как дифференциальная магнитная проницаемость μ_d колец модулируется с удвоенной частотой, появляется магнитный поток удвоенной частоты, пропорциональный величине измеряемого тока.

Переменные э.д.с. удвоенной частоты в обмотках возбуждения взаимно вычитаются, а в сигнальных складываются.

Конструкция датчика показана на рис.2. Кольца датчика выполнены из ленточного пермаллоя 8СНХС, толщина ленты 0,02 мм. Размер колец 280 x 260 x 10. Слои ленты изолируются друг от друга жаростойким изоляционным материалом. После намотки сердечника он подвергается отжигу в вакууме. Начальная магнитная проницаемость после отжига составляет $5 + 15 \cdot 10^3$, максимальная — $1,5 \cdot 10^5$, коэрцитивная сила H_k — 1,6 А/м. Отожженные кольца помещаются в жесткие каркасы из немагнитной стали, предохраняющие их от деформаций.

Так как поле измеряемого пучка составляет малую величину (при токе 100 мкА поле в сердечнике $8 \cdot 10^{-5}$ А/м) пермаллоевые кольца приходится тщательно экранировать. Экран датчика состоит из двух слоев отожженного пермаллоя толщиной 0,5 мм и одного слоя стали СТ-3. Для того, чтобы экран не образовывал короткозамкнутого витка, имеются изоляционные прокладки.

УСИЛИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ

В сигнальных обмотках датчика, наряду с полезным сигналом удвоенной частоты, присутствуют сигналы напряжения возбуждения и ее нечетных гармоник. Причем амплитуда их на 3 + 4 порядка превышает амплитуду полезного сигнала. Причина наличия напряжения возбуждения в сигнальных обмотках связана с неидентичностью колец датчика. Большой уровень помех, (составляющий в сигнальной обмотке датчика 2 + 3 вольта) вынуждает делать резонансный усилитель весьма узкополосным. Особое внимание уделяется подавлению первой гармоники, так как неизбежное присутствие нелинейности в усилителе приводит к тому, что первая гармоника

частично преобразуется во вторую и появляется ложный сигнал. Резонансный усилитель (рис.3) собран на интегральной схеме T_5 (1УТ402А). Избирательность обеспечивается резонансной отрицательной обратной связью. Частотная характеристика изображена на рис.4. Настройка элементов обратной связи на частоте сведена в таблицу I. Коэффициент усиления на удвоенной частоте 100. Ослабление первой гармоники 10^4 , третьей гармоники — 10^3 .

После усиления и селекции, сигнал удвоенной частоты принимается синхронным детектором (T_6 и T_7) и усиливается выходным усилителем-интегратором (T_8).

С выхода усилительного тракта в сигнальную обмотку датчика вводится отрицательная обратная связь, обеспечивая стабильный коэффициент усиления тракта.

Устойчивость кольца обратной связи обеспечивается постоянной времени интегратора.

СХЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ДАТЧИКА

Структурная схема генератора возбуждения (рис.3) состоит из следующих элементов:

1. Задающий генератор (T_1)—выдает синусоидальное напряжение стабильной частоты 3 кГц (стабильность $3 \cdot 10^{-2}$ %).
2. Усилитель-ограничитель (T_2)—преобразует синусоидальное напряжение в прямоугольное. Регулировка смещения на входе схемы позволяет симметризовать полупериоды напряжения в такой степени, что содержание второй гармоники на выходе генератора не превышает одного процента от выходного напряжения.
3. Напряжение усилителя-ограничителя через согласующий трансформатор T_r , подается на ключевой выходной каскад (T_3 T_4). Вы-

ходное напряжение 35В, выходной ток до 0,3 А.

4. Стабилизатор тока ($T_9 T_{10}$)—питает выходной каскад.
5. Для уменьшения содержания второй гармоники до 0,01 % имеется отрицательная обратная связь. Из напряжения выходного каскада вторая гармоника выделяется резонансным усилителем (T_{II}), детектируется фазовым детектором ($T_{I2} T_{I3}$). Получаемый постоянный сигнал в качестве смещения задается на вход усилителя-ограничителя (T_2).
6. Фильтр выполняет две функции:
 - а) уменьшает содержание второй гармоники в напряжении возбуждения до 0,0005 %. С этой целью параллельный контур $L_4 C_5$ и последовательный контур $L_5 C_7$ настроены на вторую гармонику;
 - б) обеспечивает резонансный режим возбуждения датчика. Все элементы фильтра, в том числе и индуктивность датчика, составляют последовательный резонансный контур для первой гармоники. Чтобы избежать нелинейности резонанса, индуктивность дроссели L_4 берется гораздо большей (примерно в десять раз) индуктивности датчика. Нелинейность резонанса нежелательна по той причине, что она может быть причиной возникновения релаксационных колебаний в схеме возбуждения. Генератор релаксационных колебаний составляет в таком случае участок с отрицательным сопротивлением на вольт-амперной характеристике фильтра и конденсатор C_7 на выходе стабилизатора тока. Ток возбуждения датчика для получения максимального коэффициента усиления и минимального порога чувствительности должен иметь вполне определенную форму. Формой тока возбуждения определяется и количество энергии, потребляе-

мой датчиком от цепи возбуждения.

Амплитуда напряжения второй гармоники в сигнальной обмотке однозначно связана с амплитудой второй гармоники μ_2 в спектре дифференциальной магнитной проницаемости сердечника / I /:

$$E_2 = 4 \omega S \omega_c H_c \mu_0 \mu_2$$

где ω — частота тока возбуждения,

S — сечение сердечника,

ω_c — число витков сигнальной обмотки,

H_c — поле измеряемого тока.

Остается найти такую функцию модуляции проницаемости, в которой содержание второй гармоники максимально. Известно, что такая функция представляет собой последовательность прямоугольных импульсов со скважностью 0,5 (рис.5б). Если по такому закону модулировать дифференциальную магнитную проницаемость сердечника, то потребуется форма тока возбуждения, показанная на рис.5 а / 2 /. Этой оптимальной форме тока соответствует максимальная чувствительность датчика, которая не зависит от формы кривой перемагничивания, а определяется (при условии $\mu_{гмак} \gg \mu_{гмин}$) максимальной величиной дифференциальной магнитной проницаемости.

Форма тока, весьма близкая к оптимальной, реализуется с помощью нелинейного резонанса. Нелинейный резонансный контур образуют обмотки возбуждения датчика, представляющие собой нелинейную индуктивность и конденсатор C_9 , шунтирующий эти обмотки. Полученная форма тока показана на рис.5 г.

Качественно формирование тока здесь выглядит следующим образом. Пока сердечник датчика не замagnetчен, его индуктивность велика, и ток возбуждения в датчике мал. В этот период времени через элементы $L_4 C_7$ заряжается накопительная емкость C_9 . В момент времени, когда сердечник насыщается, и индуктивность обмоток

становится весьма малой, накопительная емкость разряжается и разрядный ток может достигать больших значений. Длительность состояния насыщения определяется значениями C_3 и L'_3 , (где L'_3 индуктивность насыщенных обмоток) т.е. составляет примерно половину периода свободных колебаний контура $C_3 L'_3$. Оптимальная форма тока достигается подбором емкости конденсатора C_3 . Благодаря рекуперации энергии в контуре требуемая величина мощности от генератора значительно уменьшается по сравнению с другими способами возбуждения.

5. СХЕМА УДВОЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Сигнал для синхронизации демодуляторов берется из тока возбуждения датчика с сопротивлением R_1 (рис.3), что позволяет осуществлять жесткую привязку сигнала синхронизации к фазе тока, а следовательно, и фазе напряжения второй гармоники и осуществить хорошую фазовую стабильность. Фазовая стабильность необходима потому, что в сигнале второй гармоники имеется значительная доля квадратурной составляющей. При наличии квадратурного сигнала фазовая нестабильность преобразуется в дрейф нуля измерителя тока.

С сопротивлением R_1 сигнал синхронизации проходит через фазовращатель, представляющий собой интегрирующую цепь и подается на схему удвоения. Схема удвоения включает в себя двухполупериодный выпрямитель $D_1 D_2$ и усилитель-ограничитель на интегральной схеме T_{12} (ИТ221).

6

МАГНИТНЫЙ ШУМ ДАТЧИКА

Порог чувствительности измерителя тока определяется магнитным шумом датчика.

Теоретические исследования магнитных шумов / 3, 4 / говорят о том, что шумы, представляющие собой скачки Баркгаузена, должны иметь равномерный спектр вблизи рабочей частоты. Однако экспериментальные данные / 5 / показывают, что уровень шумов вблизи четных гармоник возрастает в несколько раз. Предполагается, что в области четных гармоник имеются другие причины возникновения магнитных шумов, не связанные со скачками Баркгаузена. В связи с этим для магнитных усилителей, работающих по принципу удвоения частоты, отсутствует методика, позволяющая теоретически оценивать уровень шумов. Экспериментально установлены следующие факторы, определяющие величину магнитного шума вблизи второй гармоники:

I. Магнитный шум уменьшается с увеличением амплитуды поля возбуждения. Для формы поля (или тока), показанной на рис.5, отсутствует ограничение поля возбуждения по максимуму. Практически же (благодаря тому, что реальное поле по форме отличается от идеального) наилучшее соотношение сигнал/шум составляет $3 \div 5 H_k$ для синусоидального поля возбуждения / 6 / и $5 \div 10 H_k$ (по нашим экспериментальным данным) при импульсном возбуждении с помощью нелинейного резонанса. Для сравнения датчик возбуждался как синусоидальным полем, так и импульсным.

Результаты сведены в таблицу 3. На рис.6 показан график зависимости чувствительности и порога чувствительности при синусоидальном и импульсном возбуждении.

7

2. Порог чувствительности уменьшается с повышением частоты поля возбуждения / 5 / пропорционально \sqrt{f} . Выбранная нами частота возбуждения 3 КГц не является предельной для ленты толщиной 0,02 мм и может быть доведена до 15 КГц, что позволит уменьшать шум в $\sqrt{5}$ раз. При этом пропорционально частоте увеличится мощность, расходуемая на возбуждение датчика.
3. Магнитный шум уменьшается с увеличением объема сердечника. Причем это уменьшение максимально при оптимальном соотношении внешнего и внутреннего диаметров кольца / 7 /, составляющем величину 1,2 + 1,4.
4. Магнитный шум датчика определяется как выбором материала сердечника, так и технологией его обработки. Уровень шума минимален при использовании сплавов - 8СНХС, 79НМ, 79НМА.

Задачей технологии - получить сердечники с однородной структурой (отсутствие вмятин, замыканий витков и т.д.), с максимально возможной величиной магнитной проницаемости и минимальной величиной коэрцитивной силы H_c .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Было изготовлено два экземпляра измерителей, из них один работает на накопителе электронов и позитронов, другой - на накопителе протонов. На накопителе протонов, при изучении фазовых и бетатронных колебаний, после накопления пучка до 200 мкА выключается высокочастотное поле резонатора, и через некоторое время пучок становится небунчирующим. В этом случае пучок регистрируется только магнитомодуляционным измерителем, так как емкостные датчики не работают.

За два месяца наблюдений временной дрейф составил 20 мкА. За 8 часов дрейф не превышает 15 мкА. Дрейф нуля от нестабильности сети в пределах 200 + 240 В практически отсутствует. Температурный дрейф при нагреве как датчика, так и электронной части прибора от + 20 до + 45°C так же не был замечен. Ниже приводятся основные параметры измерителя тока:

Диапазоны измерения (мА)	Время измерения (с)	Точность измерения (%)
0,1	1	15
0,3	0,3	5
1	0,1	1,5
3	0,03	1
10	0,03	1
30	0,03	1

Л и т е р а т у р а

1. Д.В.Афанасьев. Феррозонды. Л."Энергия" 1969.
2. Р.Я.Бергман, Л.А.Синицкий. О максимально возможном коэффициенте усиления магнитного модулятора с выходом на удвоенной частоте и способах его реализации. "Автоматика и телемеханика" т.23, № 10, 1962 г.
3. Ф.В.Бункин. Шумы циклического перемагничивания ферромагнитов. ЭТФ, 26, 1956 г.
4. Н.Н.Колачевский. Магнитные шумы. М. "Наука" 1971.
5. Р.Я.Бергман. Собственные шумы феррозондов и методика их исследования. Сб. "Геофизическое приборостроение" Л.ОКБ МГ и ОН СССР 1960 г.
6. М.А.Розенблат. Магнитные элементы автоматки и вычислительной техники. "Наука" 1966 г.
7. М.А.Розенблат. Магнитные усилители и модуляторы. Госэнергоиздат 1963 г.

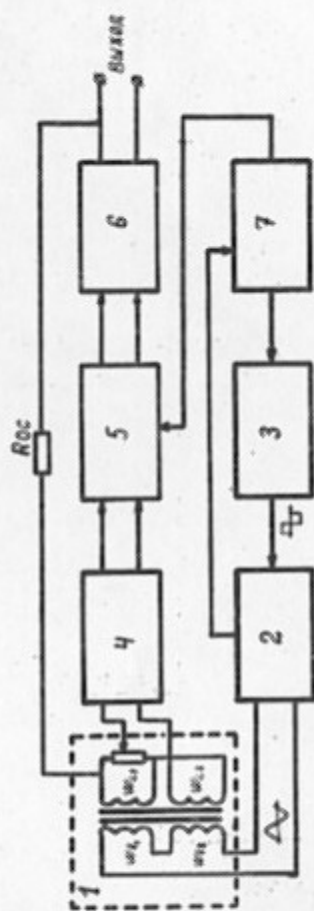


Рис.1 Функциональная схема измерителя тока.

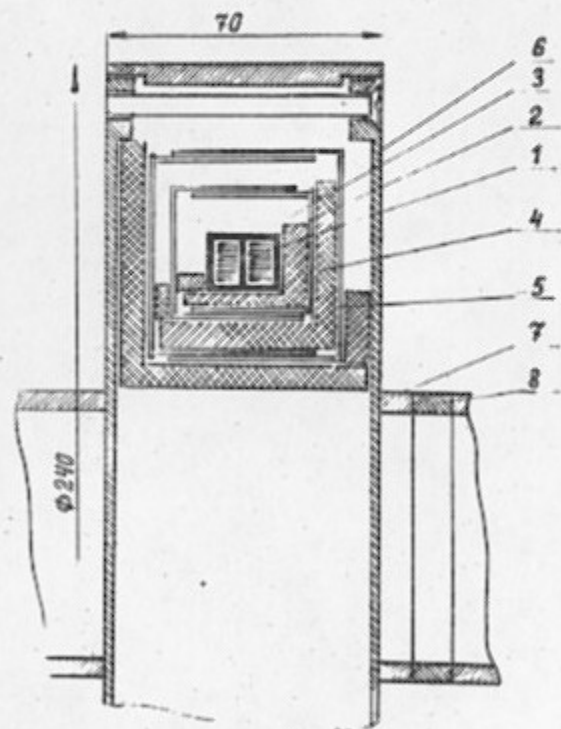


Рис.2. Конструкция датчика.

1. Магнитопровод.
2. Защитный каркас магнитопровода.
3. Обмотка.
- 4,5. Экраны пермаллоевые.
6. Экран стальной.
7. Канал накопителя.
8. Диэлектрический зазор.

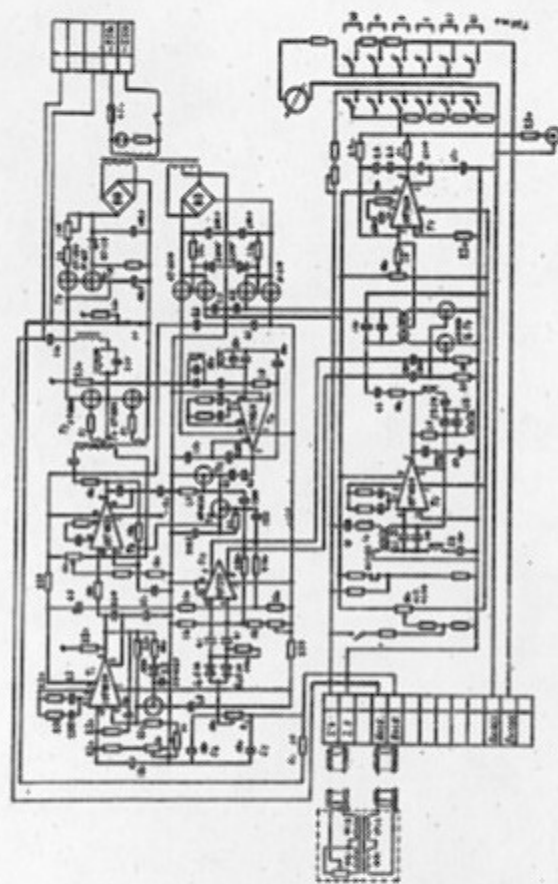


Рис.3. Принципиальная схема измерителя тока.

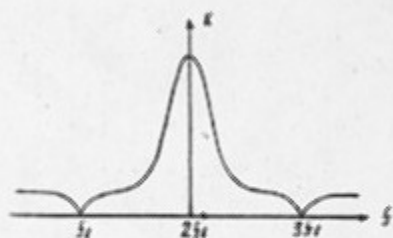


Рис.4. Частотная характеристика резонансного усилителя.

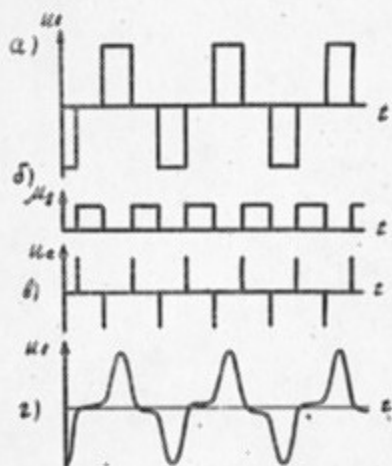


Рис.5. а/ оптимальная форма тока возбуждения,
 б/ форма модуляции дифференциальной магнитной
 проницаемости,
 в/ форма выходного напряжения.

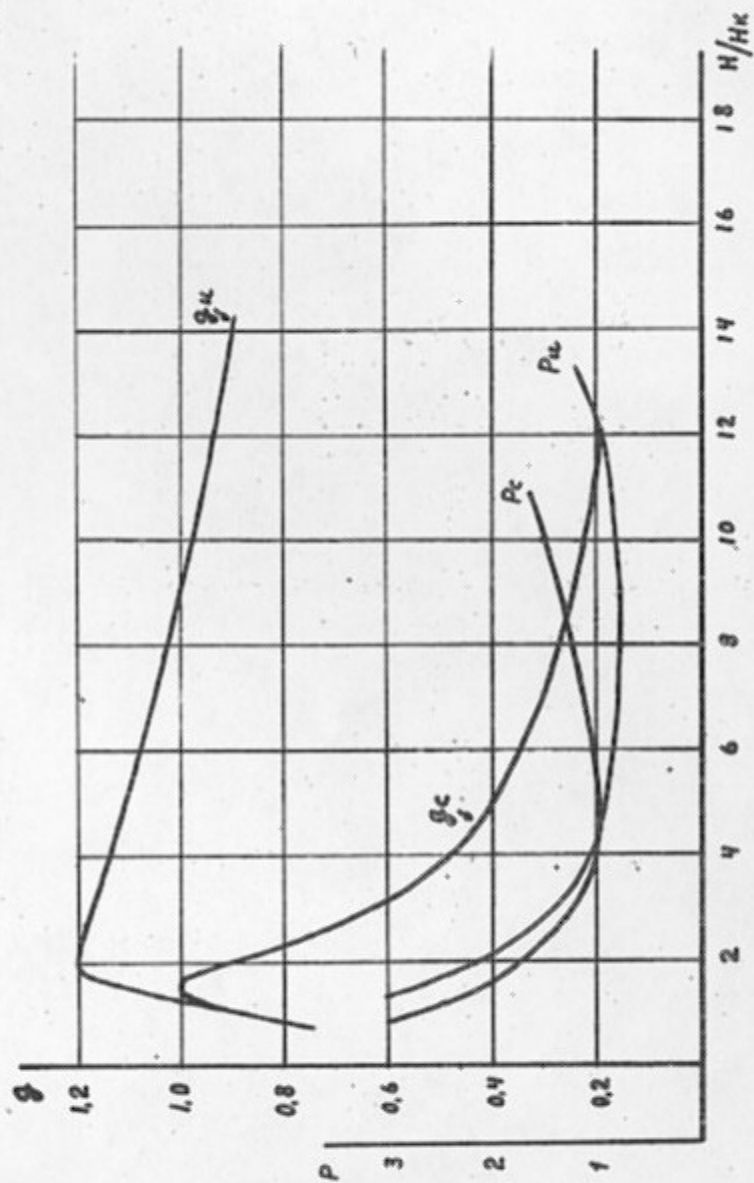


Рис.6. Графики зависимости чувствительности и порога чувствительности при
 синусоидальном /1 и 2 соответственно/ и импульсном /3 и 4 соответственно/
 возбуждении.

ЭЛЕМЕНТ СХЕМЫ.	ЧАСТОТА НАСТРОЙКИ.
$L_1 C_1$	3 μ с
$L_1 C_1 C_2$	2 μ с
$L_2 C_3$	2 μ с
$L_2 C_3 C_4$	5 μ с

Таблица I. Настройка элементов обратной связи резонансного усилителя.

Таблица 3

Параметр	Возбуждение синусоидальным током	Возбуждение импульсным током
Напряжение U_{2w} на выходе сигнальной обмотки w_c при $I_c = 100$ мкА	300 мкВ	1200 мкВ
Уровень шума мкА	15 мкА	10 мкА
Ток, потребляемый от генератора, при степе- ни заматчивания 5 H_k .	0,3 А	0,1 А

11050

Ответственный за выпуск Г.А.Спиридонов
Подписано к печати МН 08461 от 18.IX-74г.
Усл. 1,0 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно
Заказ № 70 . Препринт

Отпечатано на роталпринте в ИИФ СО АН СССР

Ca