

V-242

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

13 - 9104

ИВАШКЕВИЧ
Сергей Александрович

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ЯДЕРНЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ
ДЛЯ СИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1975

ИВАШКЕВИЧ
Сергей Александрович

**ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ЯДЕРНЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ
ДЛЯ СИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель - доктор технических наук Ю.Н.Денисов.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук Д.А.Каржавин,

Кандидат технических наук И.Б.Иссинский.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт физики высоких энергий г. Серпухов.

Автореферат разослан " " _____ 1975 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1975 года

в " " часов на заседании Ученого совета Лаборатории

ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований

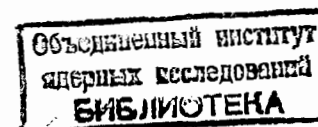
по адресу: г.Дубна, Московской области, Объединенный институт

ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физ.-матем.наук

Д.А.Батусов



Среди методов измерения индукций постоянного магнитного поля особо выделяется метод ядерного магнитного резонанса. Его отличительной особенностью является высокая точность измерения абсолютного значения индукции. Но ядерные магнитометры, в которых используется метод, - сравнительно сложные устройства, и без специальных схем процесс измерения довольно длителен. Поэтому в настоящее время они применяются главным образом в качестве образцовых приборов для калибровки и поверки измерителей, основанных на других методах. Однако достигнутые в последние годы успехи в совершенствовании ЯМР-метода и аппаратуры с его использованием свидетельствуют о том, что возможности ядерных магнитометров этим не исчерпываются и что их можно сделать надежными и удобными приборами для непосредственного изучения структуры магнитных полей в широком диапазоне. Показать это на конкретных разработках - одна из основных целей реферируемой диссертации.

Описанные в диссертации приборы разрабатывались для измерений в установках экспериментальной ядерной физики и ускорительной техники. Целенаправленность разработок определила, в частности, некоторые конструктивные особенности этих приборов, но не уменьшила их универсальности, и поэтому их можно рассматривать как приборы широкого применения.

Диссертация состоит из предисловия, пяти глав и заключения и содержит список литературы из 99 названий. В ней обобщены результаты работ автора, выполненных в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований и опубликованных в /1-15/.

Первая глава включает в себя основные сведения о ЯМР-методе измерения магнитных полей и лежащем в его основе явлении ЯМР, которое, как известно, заключается в избирательном поглощении или излучении энергии электромагнитных волн ядрами вещества, помещенного в магнитное поле. В магнитометрах регистрируется поглощение энергии. Для этого на вещество кроме измеряемого поля с постоянной индукцией B_0 накладывается еще перпендикулярное ему радиочастотное поле $B_1 \cos \omega t$ с частотой

$$\omega = \omega_0 = \gamma B_0,$$

где γ - гиромагнитное отношение ядер вещества - одна из физических констант. Индукцию B_0 можно найти из этого выражения, если известна величина γ , и после того, как зарегистрировано поглощение, измерена резонансная частота ω_0 .

Указанное вначале достоинство метода объясняется тем, что сейчас для некоторых ядер γ определены с высокой точностью ($\sim 4 \cdot 10^{-6}$ для протонов, например), а частоту современными средствами можно измерить с достаточно малой погрешностью.

Из всех разновидностей ЯМР-метода большой популярностью пользуется так называемый автогенераторный метод. Его основные достоинства: непрерывность наблюдения ЯМР, широкодиапазонность, простота настройки на резонанс, неплохая чувствительность. Он позволяет сравнительно легко автоматизировать весь процесс измерения. Для измерений сильных магнитных полей в широком диапазоне с умеренной неоднородностью его следует считать наиболее подходящим.

В этом методе постоянно действующее поле B_0 создается катушкой индуктивности колебательного контура автогенератора с перестраиваемой частотой. Рабочее вещество размещается внутри катушки. При частоте автогенератора, равной ω_0 , часть энергии катушки поглощается веществом. Изменение при этом проводимости контура регистрируется радиотехническими средствами. Непрерывность наблюдения ЯМР обеспечивается периодической модуляцией, например, измеряемого поля. Текст главы содержит описание блок-схемы такого магнитометра и ряд выражений, поясняющих сущность метода.

Вторая глава посвящена широкодиапазонным ядерным магнитометрам автогенераторного типа. Вначале обсуждаются основные характеристики магнитометров, а именно: диапазон измеряемых полей, допустимая неоднородность поля, погрешность измерения. При этом приводятся типичные их значения, указывается, от чего они зависят, приводятся также характеристики некоторых приборов, выпускаемых промышленностью.

Далее рассматриваются элементы ядерных магнитометров. В основу рассмотрения положен отобранный литературный материал и собственный опыт. При рассмотрении даются рекомендации по выбору схем, параметров и характеристик отдельных элементов.

Заканчивается глава подробным описанием схемы широкодиапазонного ядерного магнитометра на транзисторах /1/. Эта схема является развитием ранее разработанных схем магнитометров /2,3/. В магнитометрах /1-3/ используются автогенераторный метод детектирования сигнала поглощения ЯМР, осциллографический способ регистрации резонансных условий, амплитуда модулирующего поля больше ширины линии поглощения. Схемами и конструкцией предусматривается размещение в корпусе датчика, без чрезмерного увеличения его габаритов, кроме безусловно необходимых элементов весь

преобразователь ЯМР в электрический сигнал низкой частоты, что создает благоприятные условия для удаления датчика на большие расстояния от остальной части магнитометра. Необходимость в таких приборах наблюдается, например, в ускорительной технике и ряде физических экспериментов, где нередко приходится иметь дело с большими магнитами, а оператору, ведущему измерения, находиться вдали от магнита. Промышленность не выпускает подходящих для этого ядерных магнитометров.

Магнитометр на транзисторах выгодно отличается от своих предшественников отсутствием проявлений микрофонного эффекта, иногда ярко выраженного в магнитометрах, небольшими размерами датчика и другими достоинствами. Поэтому только он подробно рассматривается в диссертации.

Конструктивно магнитометр разделен на две части. Одна из них - датчик, другая объединена одним приборным корпусом и с первой связана многожильным кабелем длиной приблизительно 10 м. С измерителем резонансной частоты датчик связывается высокочастотным кабелем такой же длины. Длина кабелей при необходимости может быть в несколько раз увеличена, вплоть до 100 м.

В датчике размещены автогенератор, амплитудный детектор, катушка, модулирующая измеряемое поле с частотой 50 Гц, а также каскад, согласующий входное и выходное сопротивления соответственно частотомера и автогенератора. В качестве рабочего вещества используется слабый водный раствор $\text{Fe(NO}_3)_3$. Частота автогенератора перестраивается с помощью варикапов, напряжение на которые подается с многооборотного резистора.

Поскольку в датчике находятся транзисторы, важно знать, как сильно магнитное поле влияет на их характеристики. Проведенные исследования^{/4/} показали, что этим влиянием можно пренебречь,

если направления поля и движения носителей заряда в транзисторе совпадают, т.е. при соответствующей ориентации транзисторов в датчике.

Удаленная от датчика часть магнитометра включает в себя усилитель резонансного сигнала, схему стабилизации амплитуды на необходимом уровне, электронно-лучевую трубку для наблюдения и регистрации ЯМР, источники питания и все органы управления. Имеется также схема, сигнализирующая отсутствие возбуждения автогенератора.

Если ЯМР-метод использовать в измерениях неоднородных полей, то неминуемо возникает вопрос: каким точно должен быть объем рабочего вещества в этом случае. В литературе нет теоретически или экспериментально обоснованного ответа на этот вопрос.

В результате исследований, проделанных при разработке описанного магнитометра, была получена кривая зависимости оптимального диаметра цилиндрических ампул с рабочим веществом от индукции измеряемого поля при его неоднородности 0,5% на 1 см. В пределах полей, измеряемых прибором, кривая описывается простой эмпирической формулой:

$$d_{opt} = 1,7 \left(1 + 0,1 \frac{1}{B} \right),$$

где d_{opt} - оптимальный диаметр в мм, B - индукция в Т. Оптимальными считались те ампулы, которые обеспечивали наибольшее отношение величины сигнал/шум к ширине сигнала. Вместе с этим получены еще зависимости амплитуды сигнала и его ширины от диаметра ампул при разных неоднородностях заданного поля. Пользуясь их графиками (они приведены в диссертации) можно оценить, как сильно неоднородность влияет на амплитуду сигнала и его ширину, насколько важно выдерживать оптимальные размеры ампул.

В результате всей проделанной работы (а в магнитометре предусмотрен еще ряд мер, способствующих получению лучшего сигнала ЯМР) описанный магнитометр имеет следующие основные характеристики.

Диапазон измеряемых прибором полей лежит в пределах приблизительно от 0,05 до 2,5 Т. Он разбит на II поддиапазонов. Переход от одного поддиапазона к другому осуществляется заменой легко-съемных головок, содержащих катушку модуляции и расположенную внутри нее ампулу с веществом, на которую намотана катушка индуктивности колебательного контура автогенератора.

Если задаться случайной ошибкой результата 10 измерений, например, 0,01%, то магнитометр позволяет измерять поля выше 0,1 Т с неоднородностью до 2%/см и около 0,05 Т с неоднородностью до 1%/см. Следует заметить, что это сравнительно высокие показатели.

Для наглядности на рис. 1 и 2 показаны при разных усилениях наблюдаемые сигналы ЯМР в поле 0,1 Т с неоднородностью соответственно 1%/см и 0,01%/см.

Габаритные размеры датчика - 150 x 30 x 11 мм³. Толщина датчика - 11 мм. Она определяет минимально допустимый зазор исследуемых магнитов.

В неблагоприятных условиях - измерениях очень слабых, сильных и неоднородных полей - интенсивность сигнала ЯМР может уменьшиться настолько, что он оказывается полностью замаскированным внешними и внутренними помехами и, стало быть, использование ядерных магнитометров становится невозможным. Так как повышение интенсивности нередко связано с преодолением больших технических трудностей и принципиально ограничено, то центральная проблема, которая существует в ЯМР-методе, - это борьба с помехами. Повысить интенсивность ЯМР и уменьшить вредное действие помех в ядерных

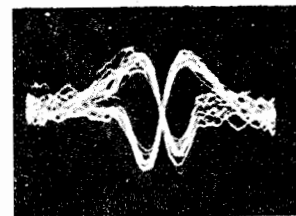


Рис. 1

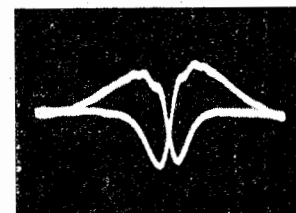


Рис. 2

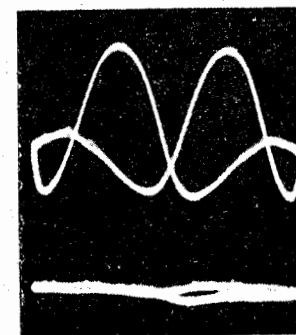


Рис. 3

магнитометрах можно несколькими способами. Они обсуждаются в третьей главе. Кроме того, в ней описывается сравнительно простое, но эффективно работающее устройство, примененное в магнитометре для улучшения отношения сигнал/помеха^{/5,6/}.

Устройство представляет собой аналоговый накопитель с положительной обратной связью, у которой задержка равна периоду следования входных импульсов, а коэффициент передачи несколько меньше единицы, иначе говоря, рециркулятор, являющийся практической реализацией оптимального фильтра для периодической последовательности видеоимпульсов.

В магнитометрах автогенераторного типа при синусоидальной модуляции больше ширины линии ЯМР и точном выполнении резонансных условий имеется последовательность равноотстоящих импульсов с частотой следования, равной удвоенной частоте модуляции $2F_m$. Именно из расчета на эту частоту следования выбиралось время задержки цепи обратной связи рециркулятора, использованного в магнитометре. При такой задержке обычно трудно устранимая в магнитометрах помеха с частотой F_m существенно ослабляется, так как на этой частоте обратная связь рециркулятора отрицательная. Кроме того, при одинаковом количестве накапливаемых импульсов со случаем, когда задержка равна периоду модулирующего поля, время накопления сокращается вдвое. Это полезно при поиске резонанса.

Правда, выбор времени задержки равным $\frac{1}{2F_m}$, а не $\frac{1}{F_m}$, потребовал заменить обычно используемый способ регистрации резонансных условий по наблюдаемому на экране трубки перемещению импульсов на другой, в котором признаком точной настройки на резонанс служит максимум амплитуды импульсов. Сравнение в равных условиях обычно используемого способа с примененным показало, что последний, по крайней мере, не уменьшает точности измерения поля.

Неширокий спектр импульсного сигнала в магнитометре, особенно при небольших амплитудах модулирующего поля, позволил в качестве задерживающего устройства использовать простую LC-линию задержки. Чтобы уменьшить ее габариты, частота модуляции увеличена до ~ 400 Гц. Для этого в магнитометре имеется специальный генератор, обеспечивающий модуляцию и горизонтальную развертку осциллографического индикатора напряжением с этой частотой. Линия задержки состоит из 200 звеньев. Конструктивно она оформлена таким образом, что ее объем - $150 \times 150 \times 60$ мм³.

Из-за нестабильности частоты генератора и времени задержки линии возможно нарушение равенства времени задержки периоду следования импульсов. Но отклонение от равенства до 1% вполне допустимо. В этом случае потери в точности настройки на резонанс не существенны. На случай больших отклонений и для первоначальной настройки в схеме генератора предусмотрена плавная регулировка частоты.

Рециркулятор включен в цепь усилителя резонансного сигнала магнитометра. Сравнение характеристик магнитометра с рециркулятором и без него показало, что рециркулятор позволяет, сохранив неизменными диапазон и точность измерений, увеличить допустимую неоднородность измеряемого поля в 2 раза.

Рис. 3 иллюстрирует работу накопителя.

Четвертая глава диссертации посвящена вопросам автоматизации измерений ядерными магнитометрами. Основное содержание главы составляют описания широкозахватной системы автоматического поиска резонанса и слежения за ним^{/7/}, а также автоматического устройства записи результатов измерения магнитного поля на перфоленту^{/8/}.

Система автоматического поиска и слежения выполнена с использованием техники преобразования временных интервалов между импульсами в управляющие напряжения. Главное достоинство описанной системы - широкая полоса захвата в режим слежения. Ширина

полосы определяется амплитудой модуляции и может превышать ширину линии ЯМР в несколько единиц и даже десятков раз. Отсюда следует высокая надежность системы. Имеются и другие ее преимущества по сравнению, например, с фазовыми детекторами, часто используемыми в магнитометрах для аналогичных целей.

Принцип действия системы основан на вычислении произведения двух напряжений, зависящих от времени. В магнитометре, где применена эта система, перемножаются напряжение импульсного сигнала ЯМР и синусоидальное напряжение с частотой модуляции. Поскольку в данном случае не требуется перемножение в строго математическом смысле этого понятия, оказалось допустимым в качестве перемножающего устройства использовать кольцевую диодную схему, которая при определенных условиях обеспечивает вполне удовлетворительные результаты требуемой операции.

До кольцевой схемы сигнал ЯМР проходит через двухсторонний ограничитель. Такая предварительная обработка сигнала полезна, прежде всего, тем, что ослабляет вредное действие шумовой помехи. Импульсный сигнал после кольцевой схемы усиливается и преобразуется в постоянное напряжение. Этим напряжением, величина и знак которого зависят от отклонений частоты (поля) от резонансного значения, с помощью варикапов подстраивается частота автогенератора. Система содержит еще схему непрерывной развертки частоты в пределах всего поддиапазона.

Таким образом, в магнитометре, в котором была использована описанная система, точная настройка на резонанс и последующее непрерывное слежение за ним в поддиапазоне осуществляются автоматически, что делает прибор весьма удобным в эксплуатации.

Максимальное время поиска резонанса при используемой частоте модуляции 50 Гц - ~ 30 с. Ускорить поиск можно, повысив частоту модуляции. При указанном времени поиска система надежно работает,

если пиковые значения сигнала ЯМР на ее входе хотя бы на 20-30% превышают пиковые значения шумовой помехи. Магнитометр с описанной системой в автоматическом режиме работы при прежних диапазонах измеряемых полей (0,05-2,5 Т) и погрешности измерения (0,01%) позволяет измерять поля выше 0,1 Т с неоднородностью до 1%/см и около 0,05 Т с неоднородностью до 0,04%/см.

Нередко измерение индукции магнитного поля - это только один этап в решении какой-нибудь научной или технической задачи, после которого следует математическая обработка результатов измерения. Так обстоят дела, например, при создании большинства современных ускорителей заряженных частиц. Если обработка ведется вычислительной машиной, то, поскольку еще не всегда удается осуществить непосредственную связь измерителя с машиной, существует настоятельная потребность в устройствах, играющих роль промежуточного звена. Таким звеном может служить описанное в заключительной части четвертой главы устройство записи результатов измерения на перфоленту, т.е. в удобном для машины виде.

Описанное устройство работает с перфоратором ПЛ-80. Оно предназначено для записи цифровой информации с электронно-счетного частотомера или цифрового вольтметра в случаях измерения поля соответственно ядерным магнитометром или магнитометром, основанным на эффекте Холла. Его схемой предусматривается также возможность записи информации, набранной вручную с помощью переключателей.

Назначение устройства не исключает возможности использования его в других случаях записи цифровой информации. Оно может служить основой для более сложных устройств. Так, дополненное необходимыми элементами, оно применяется в системе автоматического измерения топографии магнитного поля^{/9/}, которая по заданной программе управляет перемещением датчика магнитометра в зазоре

магнита, записывает на перфоленту его координаты и величину поля, автоматически выбирает нужный режим работы.

Устройство позволяет записывать семиразрядное десятичное число со знаком. Для записи на перфоленту используется пятиразрядный двоичный код. Форма записи соответствует требованиям для вычислительной машины "Минск-22".

Устройство выполнено на стандартных ячейках машины БЭСМ-3М. Число используемых ячеек - 34. В диссертации приводится подробная схема этого устройства.

Тема последней, пятой главы - ядерные стабилизаторы магнитного поля. И хотя эта тема выходит за рамки общей темы, она включена в диссертацию, так как основу любого ядерного стабилизатора составляют элементы ядерного магнитометра. Особенно убедительно общность этих приборов видна на примере ядерного магнитометра со следящей системой. Действительно, этот магнитометр практически без изменений можно использовать двояко: для измерения и стабилизации магнитного поля, дополняя его соответственно измерителем или стабилизатором частоты автогенератора. Разница будет состоять лишь в том, что в одном случае управляющим напряжением подстраивается частота, в другом - поле. В первом - частота измеряется, во втором - стабилизируется. Естественно, с учетом конкретных характеристик стабилизируемого магнита стабилизатор поля должен быть дополнен еще усилителем необходимой мощности.

Применительно к стабилизаторам поля все сказанное в диссертации об элементах магнитометров и их характеристиках остается в силе. В этом можно было убедиться, когда описанный следящий магнитометр испытывался в качестве стабилизатора поля, и испытания показали все достоинства этого прибора: хорошую надежность и точность стабилизации в пределах ранее указанных полей и допустимой их неоднородности.

Кроме указания на общность схем ядерных магнитометров и стабилизаторов в пятой главе описаны схемы ЯНР-преобразователя (датчика) стабилизатора поля^{/10/} и фазового детектора, используемого в отдельных экземплярах этого стабилизатора и других стабилизирующих системах^{/11,12/}.

В Заключении подводятся итоги проделанной работы. Они сводятся к следующему:

1. Проанализировано современное состояние дел в области разработки и создания широкодиапазонных ядерных магнитометров для сильных полей, включая такие вопросы, как автоматизация измерений и улучшение качества резонансного сигнала этих приборов. Рассмотрены элементы и характеристики приборов. Даны рекомендации, касающиеся выбора отдельных элементов, их схем, параметров, характеристик.

2. Разработан ядерный магнитометр на транзисторах, конструкция и технические характеристики которого позволяют использовать его во многих измерениях, включая измерения полей на больших расстояниях от магнита.

3. Разработан ядерный магнитометр с аналоговым устройством, характеристики которого приближаются к характеристикам фильтра, оптимального для периодической последовательности видеоимпульсов. Устройство позволило увеличить допустимую неоднородность измеряемого поля, сохранив другие характеристики прибора в прежних значениях.

4. С использованием временного дискриминатора импульсов разработан ядерный магнитометр с автоматической настройкой на резонанс и слежением за ним. Автоматическая настройка сделала прибор весьма удобным в эксплуатации.

5. Разработано автоматическое устройство записи на перфоленту результатов измерений магнитного поля с помощью ядерных и

холловских магнитометров. Оно может использоваться и в других случаях записи цифровой информации.

6. Разработаны блоки ЯМР-преобразователя и фазового детектора для широкодиапазонного ядерного стабилизатора магнитного поля.

Все описанные в диссертации разработки завершались изготовлением приборов, которые после этого длительное время эксплуатировались и эксплуатируются сейчас в разных лабораториях ОИЯИ и других научных организациях - наиболее интенсивно в Лаборатории ядерных проблем при создании магнитных систем сильноточного фазотрона (установка "Ф"), изохронного циклотрона с переменной энергией и улучшенной моноэнергетичностью выведенного пучка (У-120М) и альфа-спектрографа/10, 13-15/.

Литература

1. С.А.Ивашкевич. Широкодиапазонный ядерный магнитометр на транзисторах. Препринт ОИЯИ, 13-4969, Дубна, 1970.
2. Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. Ядерный магнитометр на полупроводниковых триодах. ГОСИИИТИ, № 17-63-438/2, 1963.
3. Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. Ядерные магнитометры с дистанционным управлением. Измерительная техника, №2, 1968.
4. Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. О влиянии магнитного поля на характеристики полупроводниковых диодов и триодов. Препринт ОИЯИ, 1083, Дубна, 1962.
5. С.А.Ивашкевич. Устройство для повышения отношения сигнал/шум в ядерных магнитометрах. Препринт ОИЯИ, 13-4045, Дубна, 1968.
6. Л.В.Васильев, Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, П.Т.Шишляников. Ядерные магнитометры с улучшенным отношением сигнал/шум. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т. I. ВИНТИ, 1970.

7. С.А.Ивашкевич. Ядерный магнитометр с автоматической настройкой на резонанс. Материалы II рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М. ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972.
8. С.А.Ивашкевич. Регистрирующее устройство с перфоратором ШИ-80 для холловских и ядерных магнитометров. Сообщение ОИЯИ, 13-6424, Дубна, 1972.
9. Д.П.Василевская, Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, П.Т.Шишляников. Система измерения магнитного поля циклотрона У-120М. Материалы рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М. ОИЯИ, Р9-5498, Дубна, 1971.
10. Л.В.Васильев, Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, А.Г.Комиссаров, В.М.Лачинов, В.И.Прилипко, Ю.И.Сусов, П.Т.Шишляников. Универсальный ядерный стабилизатор магнитного поля с плавной перестройкой стабилизируемой величины поля. Препринт ОИЯИ, 2459, Дубна, 1965.
11. Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, В.В.Калиниченко. Система стабилизации постоянного тока с датчиком на ЭПР. ПТЭ, №5, 1965.
12. Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, В.В.Калиниченко. Стабилизатор магнитного поля с широкодиапазонным датчиком на ЭПР. ПТЭ, №1, 1966.
13. Д.П.Василевская, Л.В.Васильев, Ю.Н.Денисов, Н.И.Дьяков, С.А.Ивашкевич, В.В.Калиниченко, В.М.Лачинов, В.И.Прилипко, Ю.И.Сусов, П.Т.Шишляников. Особенности измерения и стабилизации топографии неоднородных магнитных полей релятивистских циклотронов. Труды Международной конференции по ускорителям. Атомиздат, 1964.
14. Н.А.Головков, Ю.Н.Громов, Ю.Н.Денисов, Б.С.Джелепов, Ж.Мелев, С.А.Ивашкевич, В.М.Лачинов, Б.Махмудов, В.И.Прилипко, Ю.И.Сусов, В.Г.Чумин, П.Т.Шишляников. Магнитный альфа-спектрограф с двойной фокусировкой. Препринт ОИЯИ, Р13-3340, Дубна, 1967.

15. Д.П.Василевская, А.Т.Василенко, Ю.Н.Денисов, Л.Г.Денисова, С.А.Ивашкевич, П.Т.Шишляников. Автоматический стенд для измерения характеристик магнитного поля циклотрона. Материалы III совещания по изохронному циклотрону У-120М и его использованию для решения физических проблем. ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 июля 1975 года.