

P13-2002-242

С. А. Ивашкевич

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ДАТЧИК
ДЛЯ ЯМР- И ЭПР-МАГНИТОМЕТРОВ**

**Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods
in Physics Research A»**

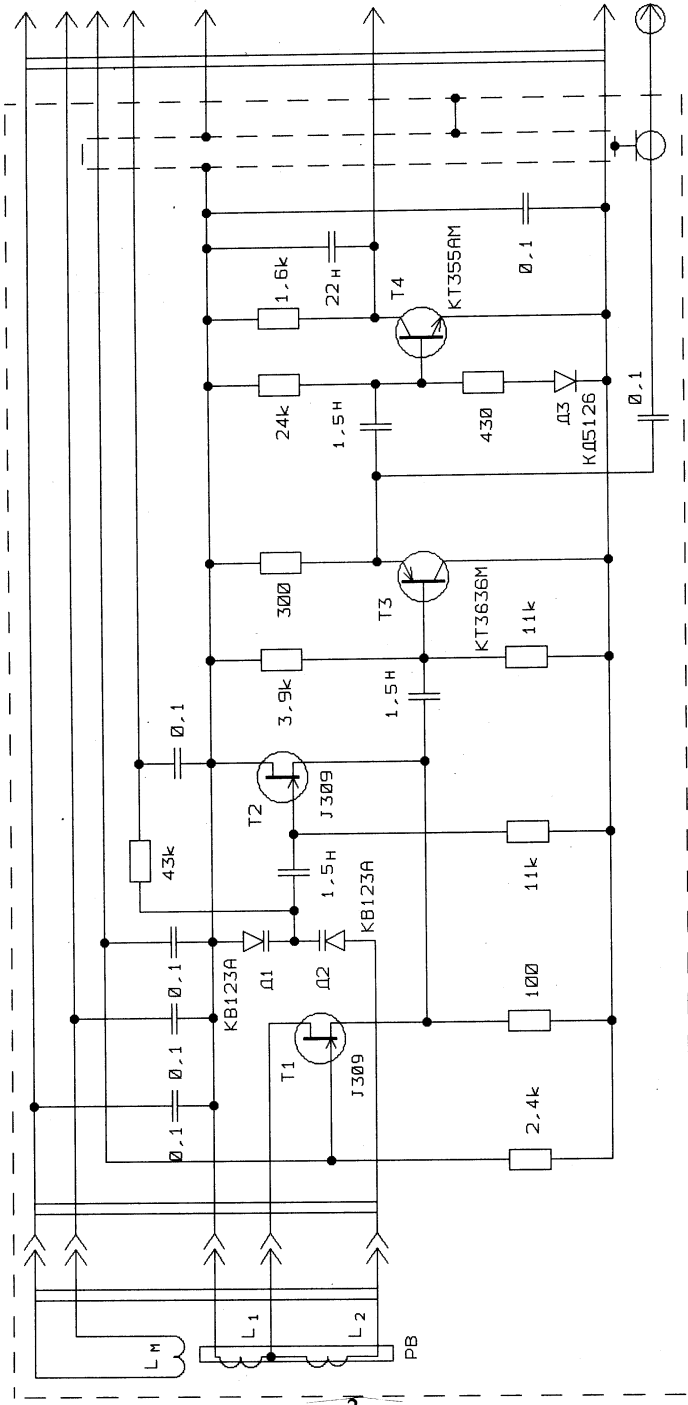
Среди методов измерения индукции B в постоянных магнитных полях высокой точностью измерения выделяется метод, в котором используется ядерный магнитный резонанс - ЯМР [1,2]. Существуют несколько его разновидностей, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки, преимущественные области применения. Для измерений полей от сотых долей до единиц тесла обычно применяются ЯМР-магнитометры, которые можно охарактеризовать так: в них используется вынужденная прецессия ядер рабочего вещества, высокочастотное поле, вызывающее ЯМР, создается катушкой индуктивности автогенератора, периодичность прохождения резонанса осуществляется модулирующим полем, выделяется резонансный сигнал поглощения, после точной настройки на резонанс B вычисляется из выражения $\omega = \gamma B$, где ω – резонансная частота, а γ - гиромагнитное отношение ядер рабочего вещества.

К недостаткам таких магнитометров относится их непригодность для измерений слабых полей из-за уменьшения интенсивности резонансного сигнала. Увеличить сигнал ЯМР в полях с небольшой индукцией можно за счет увеличения активного объема V_A рабочего вещества, но этому обычно препятствуют неоднородность B и ограниченные размеры датчика.

Известен еще один метод, который обладает хорошей точностью измерения B . Он основан на использовании электронного парамагнитного резонанса - ЭПР. По принципу действия ЭПР-магнитометры ничем не отличаются от указанных ЯМР-магнитометров. Отличия есть в самих явлениях ЯМР и ЭПР, в частности: резонансные частоты и интенсивности сигналов ЭПР во много раз превосходят эти же показатели ЯМР. Отсюда следует, что ЭПР-метод больше подходит для измерений полей с небольшой индукцией.

Отмеченные характеристики методов ЯМР и ЭПР вызывают желание использовать оба этих метода в одном приборе. То, что для ЯМР и ЭПР нужны разные рабочие вещества, – тому не помеха. Трудности появляются, когда возникает еще одно желание: сделать диапазон полей, измеряемых методами ЯМР и ЭПР, непрерывным. Это возможно при условии, что максимальная частота автогенератора для ЭПР будет соответствовать полю, в котором сигнал ЯМР имеет удовлетворительную величину при приемлемом V_A .

Для осуществления двух указанных желаний предлагается взять за основу схему датчика (см. рисунок) ЯМР-магнитометра [3]. Схема состоит из нескольких частей. Одна из них (T_1, T_2) – это автогенератор с катушкой индуктивности (L_1, L_2) его



колебательного контура, внутрь которой помещено рабочее вещество. Катушка находится в сменной головке датчика и расположена в центре другой катушки (L_M), создающей модулирующее поле. Частота ω высокочастотного напряжения $U_{Вч}$ автогенератора перестраивается варикапами Д1, Д2. Другие части схемы: амплитудный детектор (Т4) и эмиттерный повторитель (Т3). Первый выделяет огибающую амплитудно-модулированного действием ЯМР $U_{Вч}$; второй связывает автогенератор с амплитудным детектором и частотомером, измеряющим ω . Монтаж схемы выполнен обычным способом на плате с плотно расположенными деталями. Габаритные размеры датчика вместе с головкой $65 \times 18 \times 10$ мм.

Датчик соединяется с остальной частью магнитометра многожильным кабелем длиной 10-15 м. По кабелю в датчик поступают питания схемы и катушки L_M , а также управляющее напряжение на варикапы. Выходят из датчика высокочастотное напряжение для измерения частоты, переменная и постоянная составляющие выходного напряжения детектора. Переменная составляющая – это периодическая последовательность импульсных сигналов ЯМР. В магнитометре она имеет несколько назначений. Постоянная составляющая, которая зависит от амплитуды $U_{Вч}$, после некоторых преобразований в измененном виде возвращается в датчик и, влияя на режим работы Т1, стабилизирует $U_{Вч}$ на нужном уровне.

Данная схема с варикапами, имеющими минимальную емкость $C_{мин} \approx 3$ пФ, может работать до частот 350-400 МГц. Это, кстати сказать, позволяет измерять поля приблизительно до 8-9 Тл с резонансом на ядрах водорода (протонах) и таким образом получать наибольшую величину резонансного сигнала во всем диапазоне ЯМР-магнитометра.

Есть две главные причины, которые препятствуют достижению значений частот $U_{Вч}$ больше указанных. Одна из них – наличие разъема головки датчика, контакты которого увеличивают индуктивность колебательного контура автогенератора, понижая этим частоту. Вторая причина – большая величина $C_{мин}$. Поэтому, чтобы повысить высокочастотность схемы, надо иметь датчик (дополнительный) без разъема, у которого катушка L_M вместе с катушками L_1, L_2 крепились бы на монтажной плате. В этом случае связи между деталями автогенератора укорачиваются, а это эффективно способствует увеличению частоты. Кроме того, надо использовать варикапы с меньшей величиной $C_{мин}$. Испытания датчика без разъема и с варикапами, у которых $C_{мин} \approx 2$ пФ, показали, что можно достичь частот 600-650 МГц. Более того, было установлено, что если использовать варикапы с $C_{мин} \leq 1$ пФ (такие бывают), то частота ≥ 700 МГц – величина реально достижимая.

Для ЭПР частота 700 МГц соответствует $B \approx 0,025$ Тл. С магнитометром [3] в таком поле, имевшем неоднородность 0,1 %/см, при объеме водородосодержащего вещества $V_A = 0,3$ см³ отношение амплитуд сигнала ЯМР и шума $c/\text{ш} = 3$. Это отношение небольшое по сравнению с тем, которое достигает ~ 40 , например, в поле с $B = 0,2$ Тл и при $V_A = 0,02$ см³. Тем не менее с сигналами ЯМР в поле 0,025 Тл все автоматические регулировки магнитометра работают нормально. А в магнитометре автоматизированы: поиск ЯМР и точная настройка на него, регулировки амплитуд $U_{вч}$ и модулирующего поля, усиление сигналов ЯМР, установка порога пропускания сигналов над амплитудами шумов и др.

Говоря здесь об отношении $c/\text{ш}$, будет уместным отметить одно замечательное качество предлагаемой схемы, а именно: в широком диапазоне частот автогенератор в схеме работает в мягком режиме возбуждения, или, иначе говоря, при его возбуждении $U_{вч}$ плавно нарастает начиная с очень маленьких амплитуд. Такой режим способствует получению большей чувствительности схемы к проявлению ЯМР или ЭПР и позволяет выбрать, а затем зафиксировать $U_{вч}$ на оптимальном уровне, т.е. обеспечивающем наибольшее отношение $c/\text{ш}$. В создании мягкого режима важную роль играет соотношение между количествами витков в катушках L_1 и L_2 . Оно в каждой головке разное, причем в большинстве головок $L_1 < L_2$. Диаметры катушек тоже разные – от 1,5 до 7 мм в зависимости от требуемой частоты, но с учетом влияния этих размеров на величину сигнала, а в неоднородном поле и на его ширину. Общая длина катушек равна их диаметру.

Итак, из всего вышесказанного следует, что есть реальная возможность сделать магнитометр с непрерывным диапазоном измеряемых полей от долей мТл до более 15 Тл, используя в нижней части диапазона ЭПР, а в верхней – ЯМР на протонах. Насколько известно, таких приборов пока нет.

Список литературы

1. Лёше А. Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963.
2. Афанасьев Ю.В. и др. Средства измерения параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
3. Ивашкевич С.А. Широкодиапазонный ядерный магнитометр с автоматическими регулировками: Сообщение ОИЯИ Д13-2001-26. Дубна, 2001.

Получено 23 октября 2002 г.

Ивашкевич С. А.

P13-2002-242

Высокочастотный датчик для ЯМР- и ЭПР-магнитометров

Дается описание принципиальной схемы датчика одного из ядерных магнитометров. Показано, как можно повысить частоту высокочастотного напряжения в датчике до ~ 700 МГц и как такое повышение позволяет сделать магнитометр с непрерывным диапазоном измеряемых полей от долей мТл до более 15 Тл, используя в нижней части диапазона электронный парамагнитный резонанс, а в верхней — ядерный магнитный резонанс на протонах.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод автора

Ivashkevich S. A.

P13-2002-242

High-Frequency Probe for NMR and ESR Magnetometers

A circuit diagram of a probe for a nuclear magnetometer is described. It is shown how the high-voltage frequency in the probe can be increased to about 700 MHz and how this increase allows a magnetometer to be converted into a device characterized by a continuous range of measured fields from fractions of a mT to over 15 T with the electron spin resonance used in the lower part of the range and the nuclear magnetic resonance used in its upper part.

The investigation has been performed at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

*Редактор А. Н. Шабашова
Макет Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 30.10.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,25. Уч.-изд. л. 0,47. Тираж 315 экз. Заказ № 53595.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru
www1.jinr.ru