



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

26-01

Д13-2001-26

С.А.Ивашкевич

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ЯДЕРНЫЙ  
МАГНИТОМЕТР  
С АВТОМАТИЧЕСКИМИ РЕГУЛИРОВКАМИ

2001

Данная публикация посвящена краткому описанию измерителя индукции постоянного магнитного поля  $B$  с использованием ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1,2] — прибора с условным названием МЯ-22 (магнитометр ядерный, двадцать вторая разработка). Принципиальная схема этого магнитометра без входящих в его состав частотомера и платы связи с ЭВМ показана на рисунке. Она содержит всё то новое, что характерно для данной разработки, и те усовершенствования, которые сделаны в схемах предыдущих МЯ. Указанные составляющие, не включенные в схему, подробно описаны в [3,4].

По принципу действия МЯ-22 такой же, как его предшественники (см., например, [5–7]). В нем используется вынужденная прецессия ядер рабочего вещества, высокочастотное поле, вызывающее ЯМР, создается катушкой индуктивности ( $L_1, L_2$ ) автогенератора ( $T_1, T_2$ ), выделяется резонансный сигнал поглощения, периодичность прохождения резонанса осуществляется с помощью катушки  $L_M$  путем наложения на  $B$  синусоидального модулирующего поля с амплитудой  $B_M$ .

В магнитометре после точной настройки на резонанс поле  $B$  определяется из известного соотношения  $\omega_0 = \gamma B_0$ , где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядер рабочего вещества, а  $\omega_0$  и  $B_0$  — резонансные значения частоты  $\omega$  автогенератора и измеряемого поля  $B$  соответственно. Частота  $\omega_0$  измеряется частотомером. В МЯ-22 частотомер показывает результаты измерения не в единицах частоты, а в единицах поля, т.е. в нем предусмотрен пересчет  $\omega_0$  в  $B_0$ .

Схема с отмеченными выше элементами  $T_1$ ,  $T_2$  и другими, вместе с  $T_3$  (эмиттерный повторитель) и  $T_4$  (амплитудный детектор), — это схема датчика со сменной головкой. Эмиттерный повторитель как промежуточный каскад связывает автогенератор с частотомером и амплитудным детектором. Последний из амплитудно-модулированного ЯМРом высокочастотного напряжения  $U_{вч}$  автогенератора выделяет огибающую этого напряжения — периодическую последовательность импульсных сигналов ЯМР (два сигнала за каждый период непрерывно действующего модулирующего поля).

Датчик с остальной частью магнитометра соединен кабелем, одна жила которого — высокочастотный 50-омный кабель для связи с частотомером. Обычная длина кабеля около 10 м, но ее можно увеличивать. Так, в одном из МЯ [8], специально разработанном для контроля поля в ускорителе заряженных частиц, она увеличена до  $\sim 100$  м.

Последние разработки МЯ были направлены на автоматизацию всех важных настроек и регулировок в приборе, в результате чего в МЯ-22 автоматизированы: поиск ЯМР и точная настройка на него, регулировки амплитуд  $U_{Вч}$  и  $B_M$ , усиление сигналов ЯМР, установка порога пропускания сигналов над амплитудами шумов и др. Такая автоматизация не только сделала прибор удобным в эксплуатации, но и улучшила его основные характеристики.

Наиболее важные характеристики ядерного магнитометра — это диапазон и допустимая неоднородность измеряемого поля, точность измерения. Они в немалой мере зависят от отношения амплитуд сигналов ЯМР и шума, которое, в свою очередь, сильно зависит от режима работы автогенератора. Автогенератор должен работать в очень мягком режиме возбуждения и иметь амплитуду  $U_{Вч}$ , обеспечивающую наибольшее отношение сигнал/шум. Было установлено, что  $U_{Вч} \approx 50$  мВ, измеренное на выходе кабеля, — величина подходящая. Она стабилизируется схемой с М1, на вход которой поступает зависящая от  $U_{Вч}$  постоянная составляющая напряжения амплитудного детектора. Выходное напряжение схемы регулирует ток транзистора Т1 и таким образом влияет на его усилительные свойства с необходимой для стабилизации зависимостью. Подстроечными резисторами в схеме можно установить стабилизируемую величину  $U_{Вч}$  и первоначальный ток Т1.

Для нормальной работы регулирующих схем и наблюдения сигналов ЯМР на экране электронно-лучевой трубки нужна мало меняющаяся амплитуда этих сигналов. Поскольку она в разных полях  $B$  неодинаковая, то в приборе есть схема (на базе М2) автоматической регулировки усиления сигналов. Это типичная схема АРУ, на вход которой поступает переменная составляющая напряжения амплитудного детектора, т.е. сигналы ЯМР, а усиление регулируется изменением сопротивления сток-исток транзистора Т5.

При заданном  $B$  настройка на резонанс в МЯ-22 осуществляется изменением частоты  $\omega$  с помощью варикапов Д1, Д2 в колебательном контуре автогенератора. Напряжение  $U_B$  на варикапы поступает с выхода М7. Когда сигналов нет,  $U_B$  зависит только от  $U_C$  — напряжения на емкости С, подключенной к неинвертирующему входу М7. Эта емкость при замкнутом ключе 2 в М11 разряжается через открытый транзистор Т9. Как только  $U_B$  уменьшится до заданной минимальной величины, изменившимся при этом выходным напряжением компаратора 1 в М8 одновибратор 1 в М9 переводится в возбужденное состояние. В этом состоянии он на время своей выдержки замыкает ключ 1 и закрывает Т9. В это время через транзистор Т10 емкость С заряжается и напряжения  $U_C$  и  $U_B$  достигают максимальных значений. После заряда и небольшой затем паузы с возвращением одновибратора 1 в исходное состояние вновь начинается разряд С. В это время все ключи в М11, кроме второго, разомкнуты, а транзистор Т9 открыт. Т9, Т10, а также Д17, с обслуживающими их работу элементами используются здесь для создания плавных переходов в режимы заряд, пауза, разряд. Резкие переходы вызывают вред-

ную для работы магнитометра электрическую помеху. Время заряда с паузой  $\sim 1,5$  с, время разряда  $\sim 5$  с.

В магнитометре сигналы ЯМР можно наблюдать при частотах  $\omega_0$ , соответствующих полям внутри области  $B \pm B_M$ . В МЯ-22 используются только те сигналы, которые появляются во время разряда С. В другое время на вход компаратора 2 в М8 через Д15 подается напряжение, запрещающее прохождение сигналов через этот компаратор.

С появлением сигналов выходное напряжение компаратора 2 будет представлять собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов, сформированных из положительных сигналов ЯМР с выхода М2 путем ограничения их сверху и снизу. Этими импульсами возбуждается одновибратор 2 в М9, который своим действием размыкает ключ 2. Этот ключ будет разомкнутым, пока есть сигналы ЯМР, так как одновибратор 2 с перезапуском, а его время выдержки немного больше максимального временного интервала между сигналами в их последовательности. Так завершается процесс поиска резонанса в диапазоне частот одной головки датчика, и сразу же начинается точная настройка на резонанс, т.е. подстройка  $\omega$  к значению  $\omega_0$ , соответствующему измеряемому полю. После завершения настройки все четыре ключа в М11 находятся в разомкнутом состоянии, а  $U_C$  остается близким к величине в момент размыкания ключа 2.

Точную настройку в магнитометре осуществляет аналоговая схема, содержащая М4-М7. В основу настройки положено перемножение двух напряжений: синусоидального с частотой модулирующего поля и импульсного с выхода компаратора 2. Перемножение выполняет аналоговый перемножитель М4. В результате перемножения получается последовательность импульсов, амплитуда и полярность которых зависят соответственно от величины и знака отклонения  $\omega$  от  $\omega_0$  или  $B$  от  $B_0$ , иначе говоря, от расстройки [6,9,10]. С завершением точной настройки и прохождением синусоидального напряжения вместе с модулирующим полем через нуль на выходе М4 из-за конечной ширины входных импульсов будет импульсное напряжение со средним значением, равным нулю. Импульсы с выхода перемножителя поступают на вход интегратора — схема с М5. Выходное напряжение интегратора (напряжение  $\Delta U$  сигнала ошибки) проходит М6, после чего суммируется с  $U_C$ . М6 — аналоговый перемножитель с коэффициентом передачи, зависящим от  $U_B$ . Необходимость регулирования коэффициента усиления в схеме точной настройки [7,10] связана с нелинейностью характеристик варикапов.

Напряжение  $U_C$  своим действием поддерживает частоту  $\omega$  вблизи требуемой  $\omega_0$  и тем самым помогает аналоговой схеме при умеренном ее коэффициенте усиления обеспечивать высокую точность настройки на резонанс. Очевидно, что это напряжение должно быть неизменным по возможности долго, и поэтому в качестве емкости С нужен конденсатор с малыми ко-

эффицентом диэлектрической абсорбции и током утечки, например типа К73-16.

Однако в любом случае  $C$  со временем будет медленно разряжаться, что вызовет увеличение  $\Delta U$ . Как только  $\Delta U$  достигнет заданной величины  $\Delta U_{\text{макс}}$ , через замкнувшийся ключ 3 емкость  $C$  начнет подзаряжаться, и, когда  $\Delta U$  уменьшится почти до нуля, ключ 3 разомкнется и подзаряд прекратится. Этим ключом управляет один из регенеративных, т.е. с гистерезисом, компараторов в М10. Точно так же через ключ 4, управляемый другим компаратором в М10, при необходимости происходит подзаряд  $C$ . Ширина гистерезиса этих компараторов выбирается с учетом ее влияния, с одной стороны, на точность настройки, а с другой — на частоту срабатывания ключей 3,4 и устойчивость схемы. Ширина 50 мВ — неплохой компромисс.

Подзаряд или подразряд (зависит от знака  $\Delta U_{\text{макс}}$ ) включаются всегда, когда есть сигналы ЯМР и  $\Delta U \geq \Delta U_{\text{макс}}$ . Они обычно включаются, если по каким-либо причинам  $\omega$  или  $B$  начинают изменяться, и таким образом схема следит за настройкой. Подзаряд или подразряд — это необходимый процесс. Он длится недолго и не создает существенных неудобств в работе с прибором. Наличие или отсутствие точной настройки, а также отсутствие сигналов ЯМР вообще указывают светодиоды, подключенные к М12. С этой же микросхемы снимается информация о настройке, когда с частотомера в ЭВМ поступают данные о величине измеряемого поля.

Кратко описанные выше части схемы магнитометра имели свои варианты. Эти варианты с полезными подробностями опубликованы в [6,7,10,11].

Для нормальной работы схемы поиска и настройки необходимо, чтобы через компаратор в М8 проходили только те части сигналов ЯМР, которые больше шумов. В широкодиапазонном магнитометре шумы, наложенные на сигнал, имеют разные уровни амплитуд. Поэтому в МЯ-22 есть схема, содержащая М3, Т8, которая автоматически устанавливает порог пропускания сигналов в зависимости от уровня шумов. При этом порог всегда только ненамного выше шумов. Это позволяет полнее использовать сигналы ЯМР, чем в случае, когда порог устанавливается на одном уровне выше максимальной амплитуды шумов во всем диапазоне.

При разряде емкости  $C$ , иначе говоря при изменении частоты  $\omega$  сверху вниз, сигналы ЯМР появляются в области частот, которые соответствуют  $B + B_M$  и почти не заходят в область, соответствующую  $B - B_M$ : действует вышеописанный механизм настройки на резонанс. Небольшой заход возможен на короткое время, когда схема настройки находится, например, в режиме слежения за резонансом. Но тот факт, что остается все-таки достаточная область, где сигналы ЯМР не появляются, используется для получения информации о шумах в отсутствие сигналов.

Сигналы ЯМР с шумами поступают в стоковую цепь транзистора Т8 с выхода М2. Пока Т8 открыт, его сопротивление сток-исток очень маленькое,



и поэтому на входе М3 не будет никаких сигналов. Транзистор закрывается частью отрицательной полуволны синусоидального напряжения с частотой модулирующего поля. Эта часть, которая определяется параметрами и режимом работы схемы, закрывает транзистор как раз в той области, в которой сигналы ЯМР, как говорилось, не появляются. Когда Т8 закрыт и его сопротивление велико, на вход М3 поступают пакки шумового сигнала, которые затем преобразуются в постоянное напряжение. Это напряжение в качестве порога пропускания сигналов ЯМР поступает на один из входов компаратора 2 в М8. На другой вход этого же компаратора тоже подается пороговое напряжение, устанавливаемое однажды по минимальному уровню шумов. Таким образом, автоматическая регулировка вступает в активное действие при шумах, превышающих свой минимум, что способствует более эффективной ее работе.

Чтобы периодически проходить резонанс, амплитуда  $B_M$  всегда должна быть больше ширины сигнала ЯМР, выраженной в единицах магнитного поля. Но эта ширина  $\Delta B_C$  непостоянная. Она, как известно, увеличивается с неоднородностью измеряемого поля. Поэтому в магнитометре величина  $B_M$  должна быть регулируемой. Это необходимо еще и потому, что желательно иметь  $B_M$  большей величины при поиске резонанса (расширяется область наблюдения сигналов) и меньшей — при настройке на резонанс (повышается точность настройки). В МЯ-22 все это осуществляет схема автоматической регулировки  $B_M$ . Она состоит из пяти последовательно включенных каскадов (М13–М17). Схема подробно описана в публикации [12], дополнение к ней — в [13]. В связи с этим ее описание здесь дается в сокращенном виде.

В основе регулировки  $B_M$  лежит получение управляющего напряжения, пропорционального ширине сигнала ЯМР, а точнее — длительности одного из его фронтов. Здесь имеется в виду ширина  $\Delta t_C$ , выраженная в единицах времени, как часть длительности периода модулирующего поля.

Первый каскад (М13) схемы — формирователь. Он путем ограничения амплитуды входных сигналов снизу и сверху пропускает на свой выход только среднюю их часть, усиливая ее. В качестве входных используются сигналы с М2, т.е. с постоянной амплитудой. Таким образом исключаются влияния на длительность выходных импульсов крайних (переходных) частей фронтов и амплитуды входных сигналов.

С выхода М13 импульсы в следующих каскадах (М14, М15) дифференцируются и преобразуются в управляющее напряжение. В дифференциаторе (М14) используется только передний фронт сигнала ЯМР. Управляющим напряжением в перемножителе М16 регулируется синусоидальное напряжение, определяющее  $B_M$ . Здесь и в других местах, о которых говорилось раньше, используются синусоидальные напряжения с соответствующих обмоток сетевого трансформатора. Каскад с М17 — это просто усилитель мощности, питающий  $L_M$ . Подстроечными резисторами на входах в третьем и четвер-

том каскадах устанавливаются соответственно минимальная и максимальная амплитуды  $B_M$ .

Амплитуда  $B_M$  будет максимальной при отсутствии сигналов ЯМР. С сигналами она уменьшится из-за появления отрицательных импульсов на выходе дифференциатора, которые своим действием уменьшат управляющее напряжение. При этом  $B_M$  уменьшится до некоторой минимальной величины в зависимости от неоднородности  $B$  и установится однажды принятое стабильное отношение  $B_M/\Delta B_C$ . Механизм стабилизации отношения можно пояснить на примере, скажем, увеличения неоднородности  $B$ . Если неоднородность станет больше, то увеличатся  $\Delta B_C$  и  $\Delta t_C$  и, следовательно,  $B_M$ , так как амплитуда импульсов на выходе дифференциатора, зависящая от  $\Delta t_C$ , уменьшится. Но с ростом  $B_M$  ширина  $\Delta t_C$  уменьшается, в результате чего и происходит указанная стабилизация. Исходя из опыта, в МЯ-22 принято как близкое к оптимальному отношение  $B_M/\Delta B_C \approx 4$ .

Несмотря на автоматические регулировки, в МЯ-22 сохранен ручной режим настройки на резонанс и регулировки  $B_M$ . В этом режиме надо видеть сигналы ЯМР, и поэтому в приборе есть схема с электронно-лучевой трубкой. Как показывает опыт эксплуатации магнитометра, наличие указанных ручных регулировок и возможности видеть сигнал иногда бывает полезным. Переход с автоматического режима работы на ручной осуществляется нажатием кнопки переключателя S1.

В МЯ-22 диапазон измеряемых полей  $\sim 0,05 - 3,5$  Тл. Во всем диапазоне используется протонный резонанс. Нижний предел измерения ограничивается уменьшением сигнала ЯМР, верхний — характеристиками используемого частотомера. Сейчас ведутся работы по расширению диапазона и, в частности, его верхней границы до  $\sim 700$  МГц, если говорить о резонансной частоте. Магнитометр обеспечивает погрешность измерения до  $\sim 0,001\%$  (это зависит от неоднородности измеряемого поля). Это типичная величина погрешности для таких магнитометров. Допустимая неоднородность поля при погрешности измерения  $0,01\%$  —  $\sim 0,5\%$  на 1 см.

В заключение автор искренне благодарит В.В.Калиниченко, прочитавшего рукопись и сделавшего полезные замечания.

### Список литературы

1. Леше А. Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963.
2. Афанасьев Ю.В. и др. Средства измерения параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
3. Ивашкевич С.А. Частотомер для ядерных магнитометров: Сообщение ОИЯИ Р13-98-309. Дубна, 1998.



4. *Кортаев Ю.В.* Плата сопряжения ядерного магнитометра и ПК: Сообщение ОИЯИ Р13-99-23. Дубна, 1999.
5. *Ивашкевич С.А.* Широкодиапазонный ядерный магнитометр на транзисторах: Препринт ОИЯИ 13-4969. Дубна, 1970.
6. *Ивашкевич С.А.* Автоматический широкодиапазонный ядерный магнитометр: Сообщение ОИЯИ 13-80-130. Дубна, 1980.
7. *Ивашкевич С.А., Лагун Я.* Автоматический ядерный магнитометр с резонансом на протонах до 6 Тл: Сообщение ОИЯИ Р13-90-400. Дубна, 1990.
8. *Ивашкевич С.А.* Ядерный магнитометр для ускорителей заряженных частиц // Труды II Международного совещания по циклотронам и их применению, Бехине, ЧССР, 1989. Дубна: ОИЯИ, 1989. С. 199.
9. *Ивашкевич С.А.* Ядерный магнитометр с автоматической настройкой на резонанс // Материалы II рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М. Дубна: ОИЯИ, 1972. С. 89.
10. *Ивашкевич С.А.* Схема автоматической настройки на резонанс в ядерном магнитометре: Сообщение ОИЯИ 13-84-566. Дубна, 1984.
11. *Ивашкевич С.А.* Схема для быстрого автоматического поиска резонанса и настройки на него в ядерном магнитометре: Сообщение ОИЯИ Д13-93-222. Дубна, 1993.
12. *Ивашкевич С.А.* Схема автоматической регулировки модулирующего поля для ядерного магнитометра: Сообщение ОИЯИ Р13-96-196. Дубна, 1996.
13. *Ивашкевич С.А.* Расчет модулирующих магнитное поле катушек для ядерных магнитометров: Сообщение ОИЯИ Р13-96-197. Дубна, 1996.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 февраля 2001 года.