



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-196

P13-96-196

С.А.Ивашкевич

СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ
МОДУЛИРУЮЩЕГО ПОЛЯ ДЛЯ ЯДЕРНОГО
МАГНИТОМЕТРА

1996

Предлагаемая ниже схема автоматической регулировки модулирующего магнитного поля разрабатывалась для магнитометров, подобных описанным в [1—3]. Это магнитометры с использованием ядерного магнитного резонанса — ЯМР, в которых периодичность прохождения резонанса осуществляется модуляцией измеряемого (резонансного) магнитного поля B_0 . В них модулирующее поле — синусоидальное с постоянной частотой и амплитудой

$$B_m > \Delta B_c, \quad (1)$$

где ΔB_c — ширина сигнала поглощения ЯМР.

Основное назначение схемы — создать благоприятные условия для надежного поиска резонанса и точной настройки на него путем установления оптимальной силы неравенства (1) без вмешательства оператора, работающего с магнитометром.

До рассмотрения схемы полезно показать, какой диапазон регулирования B_m нужен, от чего он зависит. Чтобы это сделать, надо прежде всего знать, какие могут быть величины ΔB_c . Вообще ширина сигнала ЯМР зависит от нескольких факторов [4], но дальше будем учитывать только ее зависимость от неоднородности B_0 , полагая, что в однородном поле и с использованием одного рабочего вещества для ЯМР ΔB_c — величина небольшая и постоянная. Так, для резины — вещества с не самым узким сигналом ЯМР ядер водорода — $\Delta B_c \approx 0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Если пренебречь этой величиной, то в неоднородном поле согласно [4]

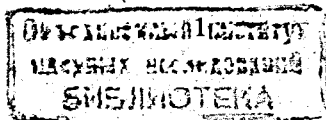
$$\Delta B_c = 2\Delta B_0, \quad (2)$$

где ΔB_0 — отклонение от среднего значения B_0 в рабочем объеме вещества (в образце).

При относительной неоднородности B_0

$$\delta = \frac{1}{B_0} \cdot \frac{dB_0}{dx} \quad (3)$$

вдоль некоторого направления x и $dB_0/dx = \text{const}$ в пределах образца с достаточной точностью



$$\Delta B_0 = B_0 \delta \frac{d}{2}, \quad (4)$$

где d — диаметр образца. Обычно используются цилиндрические круглого сечения образцы с рабочей длиной, равной d .

С учетом (2) и (4) неравенство (1) можно записать так:

$$B_M > B_0 \delta d. \quad (5)$$

Чтобы найти правую часть этого неравенства, надо при определенном d знать, какие поля будут измеряться: их диапазон и неоднородность. Выбирая силу неравенства, надо иметь в виду, что от B_M зависят такие важные параметры используемого электрического сигнала ЯМР, как его амплитуда и длительность Δt_c — тоже ширина сигнала, но в единицах времени. На выбор неравенства влияет и применяемый способ настройки на резонанс. Поэтому, учитывая все и исходя из опыта работы с магнитометрами, можно рекомендовать следующее соотношение, как близкое к оптимальному при точной настройке на резонанс:

$$B_M = 4B_0 \delta d, \quad (6)$$

т.е. отношение $N = B_M / \Delta B_c = 4$.

Несмотря на то, что соотношение (6) надо рассматривать как приблизительное, его можно использовать для того, чтобы найти необходимый диапазон регулирования B_M , связанный с зависимостью ΔB_c от δ при разных B_0 .

Так, в частном случае, когда максимальная (допустимая) для магнитометра неоднородность $\delta = 0,5 \text{ м}^{-1}$ (или в обычно принятом виде — $0,5\% \cdot \text{см}^{-1}$), в соответствии с (6)

$$B_M = 2B_0 K_1 \left(1 + K_2 \frac{1}{B_0} \right) \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

В этом выражении использована из [1] эмпирическая формула, описывающая экспериментально полученную зависимость оптимальной величины d от B_0 при указанной неоднородности. $K_1 = 1,7$, $K_2 = 0,1$ — коэффициенты в формуле. Отсюда, например, для $B_0 = 2,5 \text{ Тл}$ $B_M \approx 90 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$. Если в однородном поле, как было сказано, $\Delta B_c = 0,5 \cdot 10^{-4}$, то в данном случае необходимый диапазон регулирования B_M — $(2 + 90) \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$.

Схема автоматического регулирования B_M показана на рисунке. В ней обозначены: М1 + М3 — операционные усилители КР140УД608; М4 — ана-

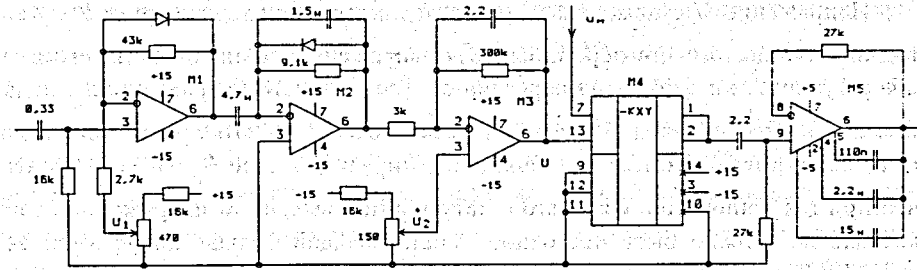


Рис.

логовый множитель сигналов 525ПС2А; М5 — мощный операционный усилитель К157УД1. Диоды — КД503А.

В основе способа регулирования B_M лежит получение управляющего напряжения U , пропорционального Δt_c , а точнее — длительности одного из фронтов импульсного сигнала ЯМР. Это делается во втором и третьем каскадах схемы.

Первый каскад схемы — формирователь. На его вход поступает импульсная последовательность положительных электрических сигналов ЯМР. Чтобы амплитуда этих сигналов не влияла на длительность используемых в дальнейшем импульсов, сигналы должны иметь постоянную амплитуду, т.е. пройти усилитель с автоматической регулировкой усиления.

Формирователь путем ограничения амплитуды входных импульсов снизу и сверху пропускает на свой выход среднюю часть амплитуды, усиливая ее. Таким образом исключаются из действия крайние (переходные) части фронтов сигнала. Нижний порог пропускания на уровне немного большем максимальной амплитуды шумов устанавливается напряжением U_1 . Максимальная выходная амплитуда ограничивается питанием операционного усилителя.

В следующем каскаде, чтобы иметь однополярные импульсы с амплитудой, зависящей от Δt_c , входная последовательность импульсов дифференцируется. При этом на выходе дифференциатора формируются импульсы только от передних фронтов сигналов, прошедших формирователь. Импульсы от задних фронтов подавляются диодом в цепи обратной связи операционного усилителя этого каскада.

После дифференциатора в третьем каскаде импульсы преобразуются в постоянное напряжение. В результате на выходе каскада напряжение U представляет собой усиленную разность двух отрицательных напряжений — U_2 и от импульсного сигнала.

Напряжение U с помощью двух последних каскадов регулирует B_M . Каскад на базе аналогового умножителя напряжением U на одном из его входов регулирует коэффициент передачи синусоидального напряжения u_M , подаваемого на другой вход. Последний каскад схемы — это просто усилитель мощности, который питает катушки, модулирующие поле B_0 . Важно сказать, что при гальванической связи его с катушками в выходном напряжении этого каскада не должно быть постоянной составляющей больше допустимой величины. Было установлено, что несколько единиц милливольт постоянного напряжения на катушках могут внести погрешность в измерение B_0 до 10^{-4} , что для прецизионных магнитометров недопустимо.

Когда сигналов ЯМР нет, напряжение U зависит только от U_2 . Оно максимальное, поэтому максимальными будут коэффициент передачи напряжения u_M , амплитуда B_M , а также область наблюдения ЯМР, так как она расширяется с увеличением B_M . Широкая область наблюдения полезна при поиске резонанса, особенно если поиск автоматический.

С появлением ЯМР в U появляется составляющая от импульсного сигнала, которая в зависимости от Δt_c уменьшает U , а значит, и B_M . В итоге устанавливается некоторое стабильное отношение N , так как Δt_c в свою очередь, зависит от B_M . Эта зависимость — обратно пропорциональная.

В дальнейшем, если, скажем, увеличатся B_0 или δ , то также увеличатся ΔB_c , Δt_c , длительность используемого фронта сигнала. От этого амплитуда импульсов на выходе дифференциатора уменьшится, а U и B_M увеличатся, стремясь сохранить N , которое было до изменений B_0 , δ . С уменьшением B_0 или δ действия в схеме будут противоположными, но тоже сохраняющими прежнее N . Короче говоря, все эти действия подобны тем, которые происходят в известных схемах, например, автоматической регулировки усиления, только здесь стабилизируется не амплитуда, а принятое N . Если по каким-либо причинам сигналы ЯМР исчезнут, то схема вновь установит максимальную амплитуду B_M и создаст благоприятные условия для поиска этих сигналов.

Испытания схемы показали, что она хорошо работает, плавно изменяя B_M приблизительно в 30 раз. И хотя этот диапазон регулирования не маленький, он не всегда будет достаточным в оптимальной мере.

В области небольших B_0 до верхнего предела, который с учетом δ можно определить по данным раньше выражения, такой диапазон регулирования B_M достаточный. В этой области желательно не превышать требуемый макси-

мальный уровень B_M , чтобы ограниченная частотная полоса пропускания схем магнитометра, через которые проходит сигнал ЯМР, не уменьшала амплитуду узкого сигнала при больших B_M . Это как раз актуально в низких полях, где сигнал ЯМР принципиально меньше, чем в больших. Отсюда следует вывод о том, что полезно иметь еще какое-то ступенчатое изменение максимальной амплитуды B_M . Это можно сделать, применяя для разных B_0 разные модулирующие катушки и ничего не меняя в схеме. Катушки в этом случае надо располагать в соответствующих B_0 сменных головках датчика магнитометра, с помощью которых обычно широкий диапазон измеряемых полей делят на поддиапазоны. Катушки должны создавать B_M из расчета на максимальное поле в поддиапазоне и допустимую для магнитометра неоднородность δ . Таким образом, в указанной области задача, связанная со ступенчатым изменением B_M , решается удобно и в полной мере.

Для больших B_0 и δ решение задачи будет неполным, если в каком-то из поддиапазонов одной головкой измерять как однородные, так и неоднородные поля: не хватит диапазона плавной регулировки. Однако в однородных полях с катушкой, рассчитанной на неоднородные поля, можно допустить недорегулирование B_M вниз, т.е. оставить B_M больше, а Δt_c меньше оптимальной величины. Действительно, в поле, например, 2,5 Тл относительной погрешности измерения поля 10^{-5} соответствует абсолютная погрешность $0,25 \cdot 10^{-4}$ Тл, что в однородном поле равняется половине ширины сигнала $\Delta B_c = 0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Обычно применяемые способы настройки на резонанс обеспечивают точность настройки в несколько раз лучше, чем полширины сигнала. Именно поэтому в таких случаях не очень важно иметь оптимальное N , или, иначе говоря, большую длительность Δt_c за счет уменьшения B_M , что способствует более точной настройке.

Вопросы, связанные с точностью измерения B_0 , выходят за рамки темы данной статьи и поэтому здесь детально не рассматриваются.

В заключение уместно отметить, что магнитометр, представленный в [3], для которого, в частности, разрабатывалась рассмотренная схема, теперь может иметь автоматическими все основные регулировки и настройки, а именно: поиск резонанса и настройку на него, усиление сигнала ЯМР, стабилизацию амплитуды высокочастотного резонансного поля и регулировку модулирующего поля.

Расчет катушек, о которых говорилось, публикуется в [5].

Автор искренне благодарит коллегу В.В.Калиниченко, внимательно прочитавшего рукопись и сделавшего полезные замечания.

Данная работа является частью проекта Государственной научно-технической программы «Фундаментальная метрология».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, 13-80-130, Дубна, 1980.
2. Ивашкевич С.А., Лагиш Я. — ОИЯИ, 13-90-400, Дубна, 1990.
3. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, Д13-93-222, Дубна, 1993.
4. Леше А. — Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963.
5. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, Р13-96-197, Дубна, 1996.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июня 1996 года.