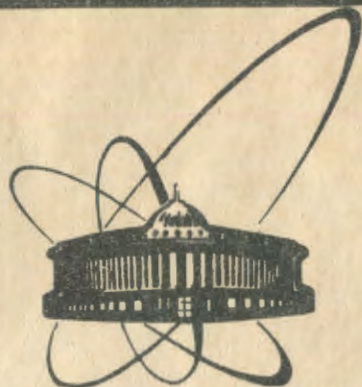


90-400



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P13-90-400

С. А. Ивашкевич, Я. Лагиш

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ЯДЕРНЫЙ МАГНИТОМЕТР  
С РЕЗОНАНСОМ НА ПРОТОНАХ ДО 6 Тл

1990

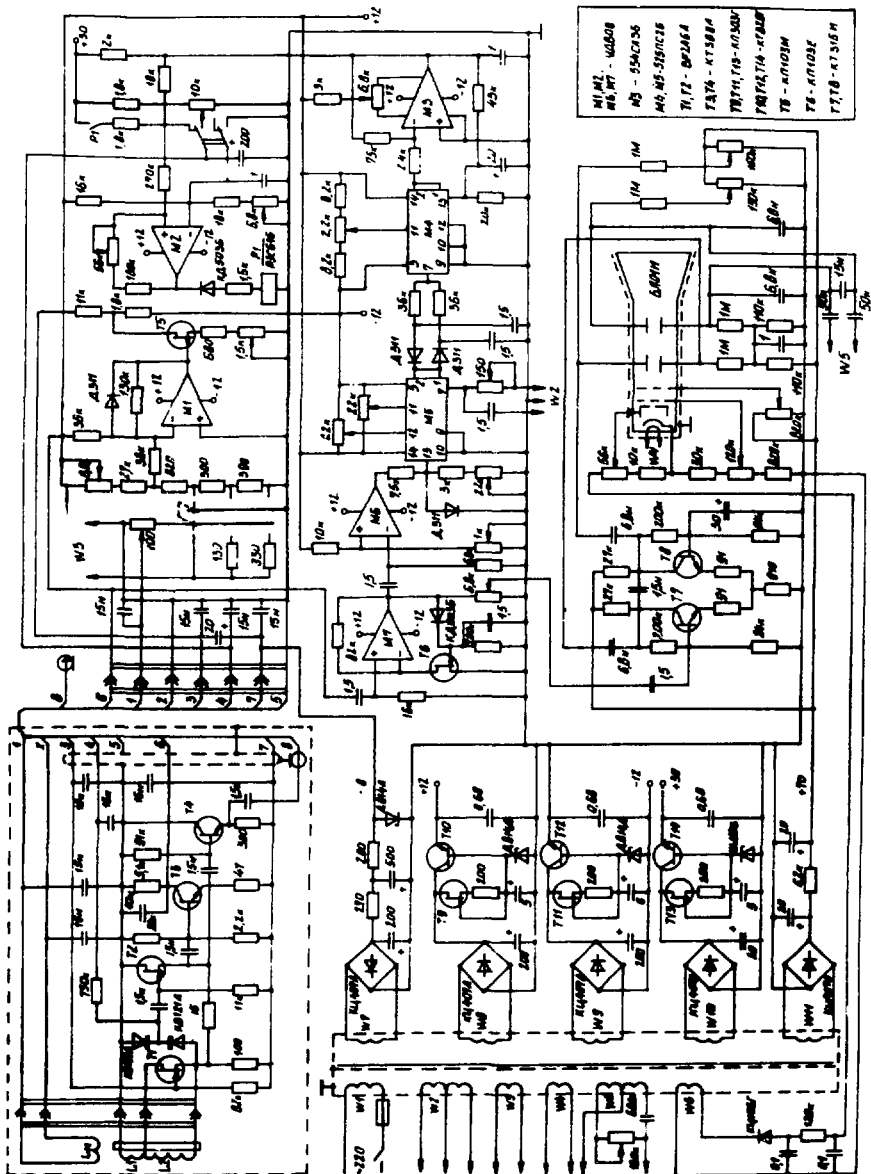
В магнитометрах с использованием ядерного магнитного резонанса (ЯМР)<sup>11</sup> для измерений очень сильных магнитных полей обычно с резонанса на ядрах водорода (протонах) переходят на другие резонансы — с меньшими резонансными частотами. Но такой переход, как известно, приводит к резкому уменьшению сигнала ЯМР и соответствующему ухудшению основных характеристик ядерного магнитометра: точности измерения или допустимой неоднородности измеряемого поля.

В описываемом ниже приборе, принципиальная схема которого показана на рисунке, резонанс на протонах сохранен до частот приблизительно 260 МГц, иначе говоря, до полей около 6 Тл. Этот прибор по принципу действия такой же, как магнитометр, подробно описанный в<sup>12</sup>, т.е. в нем используется вынужденная прецессия ядер рабочего вещества; высокочастотное поле, вызывающее ЯМР, создается автогенератором, периодичность прохождения резонанса достигается путем модуляции измеряемого поля, выделяется сигнал поглощения.

Высокочастотная часть магнитометра включает в себя автогенератор (транзисторы  $T_1$ ,  $T_2$ ), амплитудный детектор ( $T_3$ ) и повторитель ( $T_4$ ), связывающий автогенератор с частотомером. Эта часть прибора — датчик. Его схема и компактный монтаж в совокупности позволили достичь указанного верхнего предела частот и сохранить при этом важнейшее качество автогенератора в магнитометрах такого типа — очень мягкий режим возбуждения на всех частотах.

Рабочий диапазон частот в магнитометре разбит на несколько поддиапазонов. Переход с одного из них на другой осуществляется заменой сменной головки датчика. В головке находятся катушка индуктивности  $L(L_1, L_2)$  колебательного контура автогенератора с водородосодержащим рабочим веществом внутри нее и катушка  $L_M$ , с помощью которой модулируется поле. Внутри поддиапазона частота автогенератора плавно перестраивается варикапами в режимах автоматической или ручной настройки на резонанс. Пределы полей (частот) и данные катушек  $L$  для каждого поддиапазона одного из приборов, сделанных по описываемой схеме, приведены в таблице. Катушки  $L_M$  во всех головках одинаковые.

Датчик с остальной частью магнитометра и частотомером соединен кабелями, длина которых может достигать нескольких десятков метров, что, кстати сказать, является важной особенностью прибора, позволяющей вести измерения поля вдали от магнита. Габариты датчика вместе с головкой: длина — 70 мм; ширина — 17 мм; толщина — 9 мм.



Таблица

Номер головки	Поля (частоты), Тл (МГц)	Число витков $L_1 + L_2$	Диаметр $L$ , мм	Диаметр провода, мм
1	0,067-0,118 (2,86-5,03)	9+200	4,8	0,06
2	0,110-0,201 (4,70-8,55)	7+130	3,8	0,06
3	0,178-0,336 (7,59-14,3)	7+70	3,0	0,06
4	0,296-0,545 (12,6-23,2)	5+47	2,8	0,06
5	0,539-1,02 (22,9-43,4)	5+30	2,0	0,08
6	1,02-1,95 (43,4-32,8)	5+14	1,8	0,1
7	1,93-3,67 (82,3-156,4)	2+8	1,7	0,16
8	3,58-6,09 (152,3-259,4)	3+1,5	1,6	0,21

Без нарушения перпендикулярности осей катушек  $L$  и  $L_m$  головки могут быть сделаны в двух вариантах: с осью катушки  $L_m$ , направленной вдоль толщины датчика или вдоль его длины. Первый вариант — для измерений полей в магнитах с плоским зазором, второй — в соленоидах.

Известно, что уровень колебаний автогенератора, который необходим для получения большей амплитуды сигнала ЯМР, зависит от величины магнитного поля. Как показала практика, для всего диапазона полей, указанного в таблице, без существенных потерь в отношении сигнал/шум достаточно иметь только три уровня. Стабилизация этих уровней амплитуд колебаний автогенератора осуществляется схемой с операционным усилителем  $M_1$  и транзистором  $T_2$ . Управляющим сигналом в стабилиза-

торе служит разность задаваемого напряжения и постоянной составляющей напряжения на выходе амплитудного детектора, которая, естественно, зависит от уровня. Этим сигналом, полученным путем суммирования указанных напряжений на входе  $M_1$ , после его усиления регулируется режим (усиление) транзистора  $T_1$ , что в итоге и обеспечивает стабилизацию. Необходимый уровень колебаний устанавливается делителем постоянного напряжения посредством переключателя во входной цепи  $M_1$ . В невозбужденном состоянии инвертирующего автогенератора переменным резистором в истоковой цепи  $T_5$  устанавливается исходный режим  $T_1$  — его максимальный ток (около 10 мА).

Переменная составляющая на выходе детектора (сигнал ЯМР) после усилителя с автоматической регулировкой усиления ( $M_7$ ) поступает на схему автоматической настройки на резонанс и, кроме того, еще раз усиленная в схеме с  $T_7$ ,  $T_8$  — на электронно-лучевую трубку. Трубка позволяет видеть сигнал ЯМР, а также осуществлять настройку на резонанс вручную. Ручной режим настройки частоты автогенератора используется в неблагоприятных условиях, когда автоматика не обеспечивает достаточной надежности настройки. Он также полезен для контроля точности измерений в автоматическом режиме. При ручной настройке напряжение смещения на варикапы поступает с многооборотного резистора (10 к). Переключатель в цепи, питающей варикапы, обеспечивает смену режимов.

В основу автоматической настройки на резонанс положено перемножение двух напряжений — синусоидального с частотой модуляции поля и импульсного, сформированного из ЯМР-сигналов. В результате такого перемножения получается последовательность импульсов, амплитуда и полярность которых зависят соответственно от величины и знака отклонения частоты автогенератора от резонансного значения, соответствующего измеряемому полю<sup>13</sup>. По сути дела, этим выходным сигналом перемножителя  $M_5$  после его преобразования в напряжения постоянного тока в диодных цепях, суммирования этих напряжений на входе  $M_4$  и последующего усиления в  $M_4$  и  $M_3$  производится подстройка частоты автогенератора к резонансному значению. Формирование прямоугольных импульсов, поступающих на один вход  $M_5$ , производится в схеме с  $M_6$ . На другой вход  $M_5$ , а также на развертку трубки и катушку  $L_M$  синусоидальные напряжения поступают соответственно с фазовращателей и делителя в обмотках сетевого трансформатора  $W_2$ ,  $W_5$ ,  $W_3$ .

$M_4$ ,  $M_5$  — аналоговые перемножители типа 525ПС2<sup>14</sup>.  $M_3$  — компаратор 554САЗБ, используемый здесь как операционный усилитель с открытым выходом, питаемым от источника 30 В. Все остальные микросхемы — это операционные усилители УД608 (могут быть и другого типа). В датчике используются транзисторы в пластмассовом корпусе.

В работе<sup>13/</sup> показано, что коэффициент передачи схемы автостабилизации, подобной описываемой здесь, сильно зависит от частоты (напряжения смещения на варикапах), и указано, к каким неблагоприятным последствиям это приводит. Чтобы нейтрализовать эту зависимость, в магнитометре есть каскад ( $M_4$ ) с управляемым коэффициентом передачи, который увеличивается с ростом напряжения на варикапах и наоборот. Управление коэффициентом осуществляется долей выходного напряжения  $M_3$ , поступающей в качестве сомножителя на один из входов перемножителя  $M_4$  (назовем его первым входом).

Необходимое изменение коэффициента в зависимости от напряжения смещения на варикапах рассчитывается. Для расчета можно воспользоваться тем же методом, что и в<sup>13/</sup>, используя в выражении управляемого коэффициента запись выходного напряжения для 525ПС2 как функцию перемножаемых напряжений. Расчет, кстати, будет проще.

В режиме поиска резонанса, когда еще нет сигналов ЯМР, напряжение на выходе  $M_3$  не изменяется. Оно, как исходное, установлено равным нижнему пределу, к которому стремится разрядиться емкость (200 мкФ) в выходной цепи  $M_3$ , питающей варикапы. Для любого сигнала, появившегося в этом случае на другом (втором) входе  $M_4$ , коэффициент передачи этой микросхемы вначале будет минимальным, соответствующим исходному состоянию  $M_3$ , и во время действия сигнала он сразу резко не изменится из-за инерционности входных цепей  $M_4$ . Это делает схему малочувствительной к случайным кратковременным помехам, то есть такие помехи не останавливают поиска.

В режиме слежения за резонансом, когда уже есть последовательность сигналов ЯМР, в отличие от предыдущего режима на втором входе  $M_4$  появляется постоянно действующее напряжение. В итоге на выходе  $M_3$  устанавливается то напряжение, которое посредством варикапов удерживает частоту автогенератора вблизи резонансного значения. Вместе с этим устанавливается и соответствующий состоянию  $M_3$  коэффициент передачи  $M_4$ .

Поиск резонанса (развертка частоты) осуществляется за счет упомянутого разряда емкости, заряжаемой от источника 30 В через контакт реле. Состоянием реле управляет компаратор с петлей гистерезиса (схема с  $M_2$ ). Напряжения срабатывания и отпускания компаратора соответствуют принятым минимальному и максимальному напряжениям на варикапах — приблизительно 2 и 25 вольт.

В качестве водородосодержащего вещества в магнитометре используется резина. Как показали специальные исследования, амплитуда сигнала ЯМР на резине приблизительно в 1,5 раза меньше, чем на обычно используемом водном растворе. Это, конечно, немного ухудшает характеристики магнитометра, но зато исключает те неприятности, которые возникают из-за высыхания раствора.

По описываемой в данной работе схеме магнитометра изготовлено уже 10 приборов. Исследования характеристик одного из них дают основания говорить, что для данного магнитометра при погрешности отдельного измерения 0,01% допустимая неоднородность измеряемого поля — около  $0,5\% \text{ см}^{-1}$ . Исследования проводились, правда, не во всем диапазоне полей, так как это очень трудоемкая работа и, главное, — требующая специальной конструкции магнитов.

В заключение авторы хотели бы сказать, что они не ставили своей целью детальное описание прибора. Они стремились, в основном, показать лишь то новое и существенное, что позволяет специалистам иметь достаточное представление о принципе действия прибора в целом, отдельных его частей, а также о некоторых его характеристиках. Хорошим дополнением к этому будут тексты работ<sup>1,2, 3</sup>.

Кроме того, авторы считают полезным обратить внимание на то, что ядерный магнитометр можно собрать, используя несколько лабораторных приборов и две части из описанной схемы, а именно: датчик ( $T_1 \div T_4$ ) и стабилизатор амплитуды ( $M_1, T_5$ ). Для такого магнитометра нужны следующие приборы: источники питания указанных частей схемы, осциллограф, чтобы видеть сигнал ЯМР и осуществлять настройку на резонанс, низкочастотный генератор синусоидальных напряжений для питания катушки  $L_M$  и горизонтальной развертки осциллографа, а также частотомер, который нужен в любом случае. Собранный таким образом измеритель поля будет отличаться от вышеописанного, по сути дела, лишь отсутствием автоматической настройки на резонанс. Не это не исключает возможности использования его, скажем, для некоторых контрольных измерений магнитного поля, калибровки, например, датчиков Холла и других применений. Недостаток, связанный с отсутствием автоматической настройки, окупается быстротой сборки магнитометра. Как показала практика, при наличии датчика с необходимыми головками такой магнитометр можно собрать и подготовить к работе за 3-4 часа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леше А. — Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963.
2. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, 13-80-130, Дубна, 1980.
3. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, 13-84-566, Дубна, 1984.
4. Темонтеев В.Н. и др. — Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел

11 июня 1990 года.