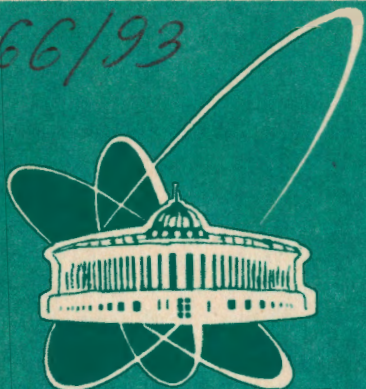


93-222

5866/93



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

406141

345e4

Д13-93-222

С.А.Ивашкевич

СХЕМА ДЛЯ БЫСТРОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА РЕЗОНАНСА
И НАСТРОЙКИ НА НЕГО
В ЯДЕРНОМ МАГНИТОМЕТРЕ

1993

В магнитометрах с использованием ядерного магнитного резонанса [1,2] при измерении магнитных полей надо производить несколько регулировок и настроек. Если не автоматизировать хотя бы часть из них, то эти магнитометры будут приборами, неудобными в эксплуатации, с весьма ограниченным применением. Поэтому современные ядерные магнитометры обычно содержат схемы, автоматизирующие измерительный процесс. В [3—5] описаны, в частности, схемы для автоматического поиска ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и настройки на него. Но они имеют один существенный недостаток — медленный (около 30 с) поиск резонанса. Имеется в виду поиск в пределах полей (частот), которые определяются сменной головкой датчика. Реально это в диапазоне полей с отношением его крайних значений приблизительно 1,8. Указанный недостаток особенно проявляется, когда возможны нарушения (срывы) режима настройки, например в измерениях с перемещениями датчика в пространстве с неоднородным магнитным полем.

В предлагаемом здесь варианте схемы для автоматического поиска резонанса, настройки на него и слежения за ним время поиска уменьшено приблизительно в 10 раз. Вместе с этим уменьшена и погрешность настройки, что тоже очень важно.

Схемы, упомянутые выше и предлагаемая здесь, разрабатывались для магнитометров, подобных представленному в [3]. В [3] описан магнитометр, в котором используется вынужденная прецессия ядер рабочего вещества; высокочастотное поле, возбуждающее резонанс, создается автогенератором, выделяется сигнал поглощения, периодичность прохождения резонанса осуществляется модуляцией измеряемого поля. Это так называемые ядерные магнитометры обычного типа, которые, кстати сказать, в силу своих достоинств наиболее широко применяются.

Принцип действия предлагаемой схемы можно пояснить с помощью структурной схемы рис.1. Поиск и настройка осуществляются управляющим напряжением U , которое подается на варикапы, включенные в колебательный контур автогенератора для регулировки частоты. U — это напряжение на выходе суммирующего устройства $СУ$, в котором суммируются U_c — напряжение на конденсаторе C и ΔU — напряжение сигнала ошибки. Сигнал ошибки вырабатывает аналоговая схема точной настройки частоты автогенератора ω на резонансное значение $\omega_0 = \gamma B_0$ (в дальнейшем для

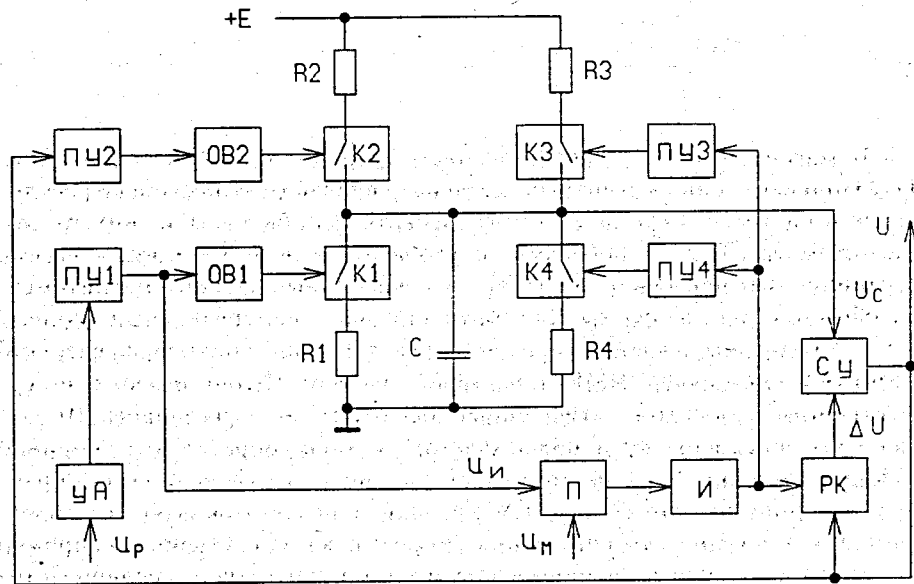


Рис.1

краткости — резонанс). B_0 — резонансная величина измеряемого поля B ; γ — гиромагнитное отношение ядер рабочего вещества.

В основу точной настройки положено перемножение двух напряжений: синусоидального с частотой модуляции поля $B - u_M$ и импульсного — u_H , сформированного из последовательности сигналов ЯМР — u_p . Импульсы формируются пороговым устройством ПУ1 после прохождения u_p усилителя с автоматической регулировкой усиления УА. В результате перемножения получается последовательность импульсов, амплитуда и полярность которых зависят соответственно от величины и знака отклонения ω от ω_0 или B от B_0 , иначе говоря, от расстройки [3,4]. После перемножителя П импульсный сигнал интегрируется в интеграторе И и, пройдя управляемый регулятор коэффициента передачи схемы РК, в виде ΔU поступает на вход СУ. Необходимость регулировки коэффициента [4,5] связана с нелинейностью характеристик варикапов. В качестве П и РК используются аналоговые перемножители сигналов [6].

Напряжение ΔU появляется с резонансом в интервале полей $B \pm B_M$. B_M — амплитуда модулирующего поля, в нашем случае синусоидального. Без сигналов ЯМР: $\Delta U = 0$, U_c , а следовательно и ω , зависят лишь от U_c , и идет поиск резонанса. В этом случае ключ К1 замкнут и конденсатор C разряжается до уровня U_c , соответствующего принятому минимальному напряжению на варикапах. С достижением этого уровня одновибратор ОВ2 пороговым устройством ПУ2 переводится в возбужденное состояние. При этом ключ К2 замыкается. За время выдержки одновибратора (около 1с) конденсатор C через ключ К2 быстро (около 0,5 с) заряжается и напряжение на варикапах достигает максимальной величины. С переходом ОВ2 в исходное состояние К2 размыкается и вновь идет разряд C до появления на входе одновибратора ОВ1 сигнала, который сможет возбудить его и в результате разомкнуть ключ К1. Если сигналом будет случайная помеха, то после короткой задержки на время выдержки ОВ1 поиск резонанса продолжается. С появлением u_p ключ К1 размыкается и остается в этом состоянии, так как ОВ1 — одновибратор с перезапуском, а его время выдержки немного больше максимального временного интервала между импульсами в u_p (20 мс при частоте модуляции поля 50 Гц). Можно считать, что в это время все ключи разомкнуты и U_c остается неизменным и равным величине в момент размыкания К1.

В общем случае напряжение U_c не обеспечивает точной настройки на резонанс. С появлением u_p оно лишь держит частоту автогенератора вблизи резонанса. Точную настройку, как уже говорилось, осуществляет аналоговая схема, вырабатывающая напряжение ΔU , зависящее от расстройки. Однако, действуя указанным образом, U_c помогает аналоговой схеме при умеренном ее коэффициенте усиления обеспечивать высокую точность настройки.

Очевидно, что U_c не может оставаться неизменным бесконечно долго. Конечные величины входного сопротивления СУ (операционный усилитель), сопротивлений разомкнутых ключей (электронные ключи), ток утечки самого конденсатора (типа К52-2) ведут к медленному разряду C . Связанное с этим изменение U_c компенсируется увеличением ΔU . А это ведет к непредусмотренному уменьшению точности настройки и, в конце концов, к срыву настройки. Чтобы этого не происходило, в схеме есть цепь подзаряда C через ключ К3. К3 замыкается пороговым устройством ПУ3, которое срабатывает при достижении напряжения на выходе интегратора некоторой заданной величины. После уменьшения этого напряжения, а значит и ΔU , приблизительно до нуля К3 размыкается. Точно так же через

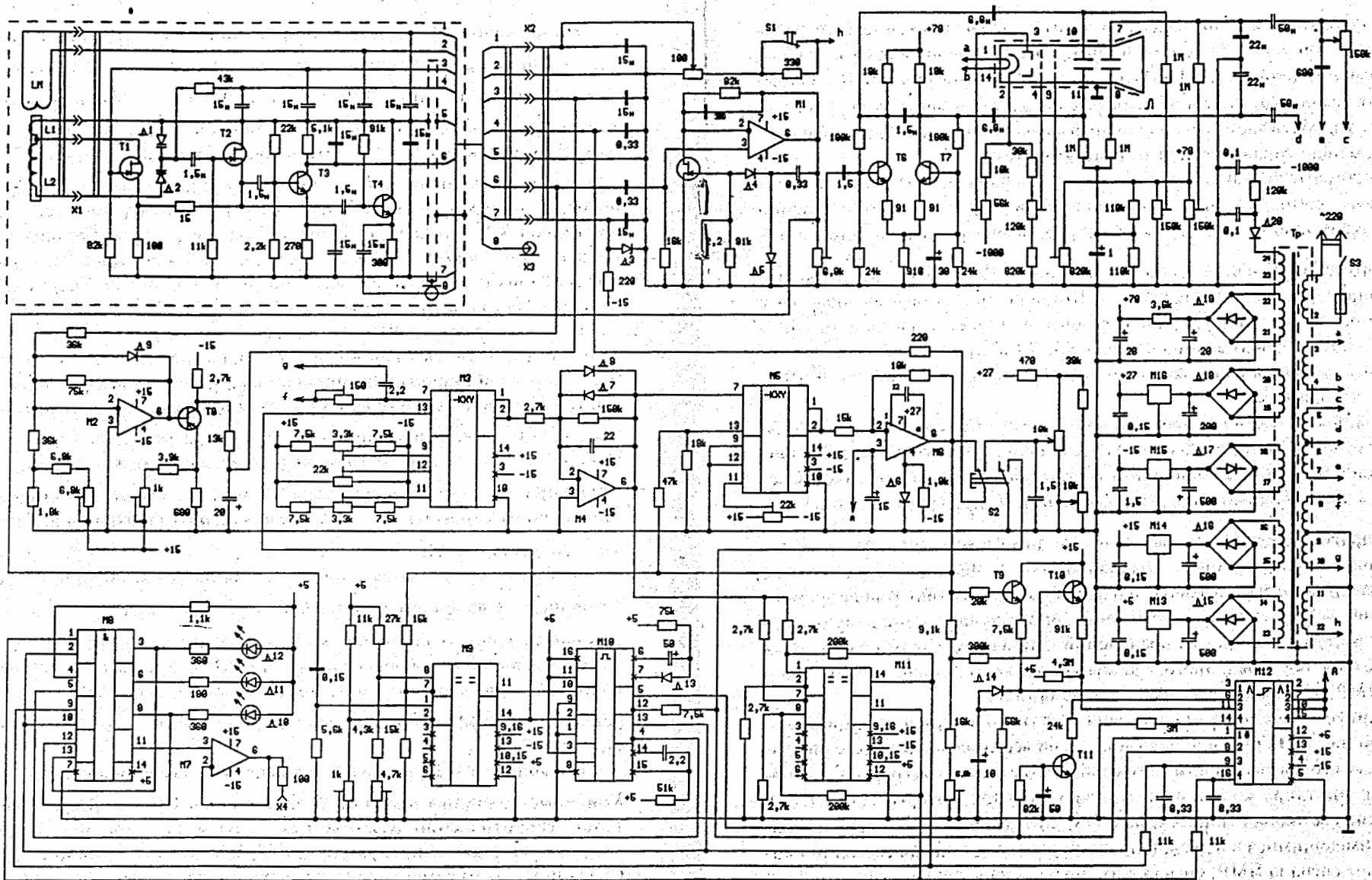


Рис.2. M1, M2, M4, M7 — КР140УД608; M6 — КР140УД1408; M3, M5 — 525ПС2А; M8 — К155ЛИ1; M9, M11 — КР597СА3; M10 — К155АГ3; M12 — К590КН5; M13 — 142ЕН5А; M14 — К142ЕН8В; M15 — μ A7915С; M16 — К142ЕН9В; T1, T2 — ВF246А; T3, T4 — КТ368А; T5 — КР507Б; T6, T7 — КТ315И; T8 — КТ361Д; T9-T11 — КТ315Д; Д1, Д2 — КВ121А; Д3 — Д814А; Д4, Д5, Д9 — ГД507А; Д6 — КС147Г; Д7, Д8, Д13, Д14 — КД503А; Д10, Д12 — АЛ307Б; Д11 — АЛ307А; Д15-Д19 — КЦ407А; Д20 — КЦ106Г; Л — БЛ01И

ключ К4 происходит и подразряд С, когда выходное напряжение интегратора достигнет той же заданной величины, но с противоположным знаком. Таким образом, цепи с К3, К4 и П следят за отклонениями ω или V в любую сторону от резонанса. Ведущую роль здесь играет перемножитель, так как именно он вырабатывает первоначальный сигнал ошибки, который в преобразованном виде управляет другими частями схемы.

Все пороговые устройства в схеме — это компараторы. ПУ1, ПУ2 — однопороговые компараторы с установленными порогами соответственно больше максимальной амплитуды шумов, наложенных на u_p , и меньше ми-

нимального рабочего напряжения на варикапах. ПУ3, ПУ4 — регенеративные компараторы, т.е. с гистерезисом. Ширина гистерезиса выбирается с учетом того, что она влияет, с одной стороны, на точность настройки, с другой — на частоту срабатывания ключей К3, К4 и, кроме того, на устойчивость схемы при очень маленькой ширине. Ширина, скажем, около 50 мВ — неплохой компромисс.

Показанные в схеме сопротивления, кроме высокоомного резистора R4, — это реально цепи, состоящие из нескольких элементов и представляющие собой управляемые нелинейные сопротивления. Их нелинейность используется для сглаживания резких изменений U_c при срабатывании ключей и для других целей. Сглаживание необходимо потому, что даже небольшие скачки напряжения, появившиеся в цепях, связанных с автогенератором, могут вызвать паразитную модуляцию генерируемого напряжения — очень неприятное явление, нарушающее нормальную работу магнитометра. Это одно из проявлений капризного характера ядерных магнитометров, обусловленного, главным образом, маломощностью самого явления ЯМР, вызывающего рабочую модуляцию.

Описанный выше принцип действия схемы реализуется принципиальной схемой рис.2. На рисунке показана схема всего магнитометра с описываемой здесь его частью. Части схемы вне темы статьи описывать нет необходимости: они такие же или мало отличаются от тех, которые есть в [3,5]. Исключение составляет лишь схема с M8, которая раньше не использовалась. Она имеющимися в ней светодиодами указывает на три состояния настройки: нет сигнала ЯМР, сигнал есть, но частота ω еще не равна ω_0 (она выше или ниже) и, наконец, завершение настройки, когда ω равна ω_0 или, строго говоря, мало отличается от нее. Повторитель (M7), связанный с этой схемой, предназначен для подачи на электронно-счетный частотомер потенциала, запрещающего измерение частоты автогенератора или разрешающего, когда настройка завершена.

Схему со светодиодами надо рассматривать как первый шаг к тому, чтобы исключить из магнитометра его громоздкую часть с электронно-лучевой трубкой. Пока трубка сохранена, так как в приборе еще не автоматизирована регулировка амплитуды B_M , B_m в зависимости от величины и неоднородности B устанавливается вручную, а для этого надо видеть сигнал ЯМР. Совершенствование прибора продолжается, и есть уверенность, что и эта регулировка будет автоматизирована.

Первые испытания магнитометра показали, что время поиска резонанса и настройка на него — около 3 с. С используемыми элементами время разряда C после настройки до включения подзаряда — не меньше 30 с, что практически не создает каких-либо неудобств в измерительном процессе. В автоматическом режиме погрешность измерения абсолютной величины магнитного поля 10^{-5} — величина реально достижимая. Другие характеристики магнитометра приблизительно такие же, как у приборов, описанных в [3,5]. Все это позволяет говорить, что представляемый ядерный магнитометр имеет немало достоинств и может найти широкое применение, в том числе и как образцовый прибор первого разряда [2]. Конечно, необходимы еще исследования его характеристик. Надо, скажем, получить характеристики во всем диапазоне измеряемых полей с разной неоднородностью, определить границы условий, в которых достигается минимальная погрешность измерения и др. В полной мере это сделать непросто, потому что для получения некоторых характеристик требуется специальное оборудование. Однако, как показывает практика, отсутствие части характеристик таких магнитометров не препятствует их применению. Действительно, магнитометр [5], например, для которого разрабатывалась описанная схема настройки, в течение нескольких лет успешно используется в Институте физики высоких энергий (Протвино). Там он применяется для измерений в магнитных диполях ускорительно-накопительного комплекса в широком диапазоне полей, вплоть до 6 Тл (можно сделать и до 10 Тл) с ЯМР на протонах.

В заключение автор искренне благодарит Калининченко В.В., прочитавшего рукопись и сделавшего полезные замечания, Кокореву А.Н., аккуратно выполнившего монтаж прибора, и Лещенко Г.П., старательно рисовавшую схему.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леше А. — Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963.
2. Афанасьев Ю.В. и др. — Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.

3. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, 13-80-130, Дубна, 1980.
4. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, 13-84-566, Дубна, 1984.
5. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, P13-90-400, Дубна, 1990.
6. Тимонтеев В.Н. и др. — Аналоговые перемножители сигналов в радио-электронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 июня 1993 года.