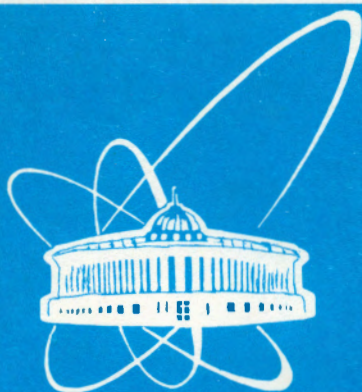


98-309



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-309

P13-98-309

С.А.Ивашкевич

ЧАСТОТОМЕР ДЛЯ ЯДЕРНЫХ МАГНИТОМЕТРОВ

1998

В магнитометрах с использованием ядерного магнитного резонанса [1,2] измеряемое поле  $B_0$  определяется из соотношения

$$B_0 = 2\pi f_0 / \gamma, \quad (1)$$

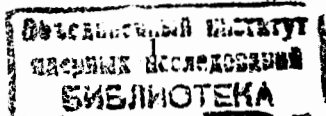
где  $f_0$  — резонансная частота, которая измеряется после точной настройки на резонанс, а  $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядер рабочего вещества. В магнитометрах чаще всего используется резонанс ядер водорода, т.е. протонный резонанс. В этом случае [2] с достаточной точностью

$$2\pi / \gamma = 0,0234874 \text{ Тл} / \text{МГц}. \quad (2)$$

Для измерения  $f_0$  можно использовать обычные универсальные частотомеры с подходящими характеристиками, но лучше иметь частотомер, специально разработанный для магнитометра. Он будет проще и дешевле универсального. В нем можно сразу предусмотреть пересчет  $f_0$  в  $B_0$ , т.е. сделать его показания не в единицах частоты, а в единицах поля, и, что немаловажно, минимизировать электрические помехи, вносимые им в магнитометр. Некоторые универсальные частотомеры, подключенные к магнитометру, создают большую и трудноустраняемую помеху.

Предлагаемая здесь схема частотомера (см. рисунок) разрабатывалась для ядерных магнитометров с вынужденной прецессией ядер — магнитометров, подобных описанным в [3—5]. Основой схемы является популярная и недорогая микросхема М6 — многофункциональный счетчик IСМ7226А. Подробное описание этого счетчика и примеры его применения можно найти в каталогах фирм, его выпускающих (например, «Harris Semiconductor»). Один из примеров применения воспроизводится в [6].

Так как М6 работает только до 14 МГц, то в частотомере в качестве предварительного делителя частоты  $f_0$  используется микросхема М5 — счетчик 11С90, который при величине входного сигнала 350 мВ (от пика до пика) работает до 650 МГц и может делить частоту на 10 или 11. С выхода этого делителя сигнал с частотой  $f_0/11$  (используется деление на 11) подается на вход А (IN A). Необходимую для М5 амплитуду сигнала обеспечивает транзисторный усилитель (Т), который по 50-омному кабелю принимает с магнитометра синусоидальный сигнал с частотой  $f_0$  и амплитудой в пределах



50÷100 мВ. Такая входная часть схемы позволяет работать приблизительно до  $f_0 = 150$  МГц или, иначе говоря, до  $B_0 = 3,5$  Тл при протонном резонансе.

Опорная (кварцевая) частота  $f_k$ , необходимая для работы частотомера, создается подключением к выводам OSC IN и OSC OUT кварцевого резонатора КР 1МГц с дополнительными элементами, показанными на рисунке, а также связью CTRL IN — R8, D2—D2, которая нужна при  $f_k = 1$  МГц. Конденсатором C7 осуществляется небольшая подстройка  $f_k$ .

В частотомере применен простой способ пересчета  $f_0$  в  $B_0$ . Суть его заключается в использовании режима измерения отношения частот  $f_A/f_B$ , где  $f_A$  — частота, пропорциональная  $f_0$ ,  $f_B$  — стабильная частота, обеспечивающая выполнение равенства (1). В схеме  $f_A = f_0/11$ , а  $f_B = f_k/K$ , где  $K$  — коэффициент деления программируемого делителя M1—M3. Делитель принимает сигнал с частотой  $f_k$  с буферного каскада в M6 (DUFF OSC OUT), а свой выходной сигнал передает через инвертор в M4 на вход В (IN В). В этом случае

$$f_A/f_B = Kf_0/11f_k. \quad (3)$$

Режим измерения  $f_A/f_B$  задается связью FUNC—R9—D2.

Из выражений (1)—(3) можно найти величину  $K$ , которая обеспечивает равенство численных значений  $B_0$  и  $f_A/f_B$ . Это будет при

$$K = 11f_k \frac{2\pi}{\gamma} = 0,2583614. \quad (4)$$

Однако иметь именно такой  $K$  необязательно. Можно  $f_k$  поделить на 2584, точного совпадения последовательностей цифр в числах  $B_0$  и  $f_A/f_B$  достичь подстройкой  $f_k$ , а необходимое место запятой (десямальной точки) в индицируемом числе установить внешними связями в M6. Режим установки запятой обеспечивает связь CTRL IN—R8, D2—D3.

Так как число 2584 в шестнадцатиричном представлении A18, то такой коэффициент деления реализуется всего тремя четырехразрядными двоичными счетчиками типа ИЕ7 с предустановкой A18 соответственно в M3, M2, M1. Для задержки сигнала сброса этих счетчиков в исходное состояние используются два последовательно включенных инвертора в M4. С одного из них сигнал поступает еще на вход В, о чем уже говорилось.

Оставшиеся четыре инвертора в M4 подключены в качестве промежуточных каскадов к выходам BCD, на которых содержится цифровая информация

об индицируемом частотомером числе (величине  $B_0$ ). Эта информация может быть полезной в дальнейшем ее использовании.

В M6 выходы BCD и BUFF OSC OUT можно нагружать только на один вход маломощных микросхем с диодами Шотки, поэтому M4 и M1 должны быть серии типа K555. M2, M3 желательно использовать из серии типа K155. В таком варианте схема в целом работает надежнее.

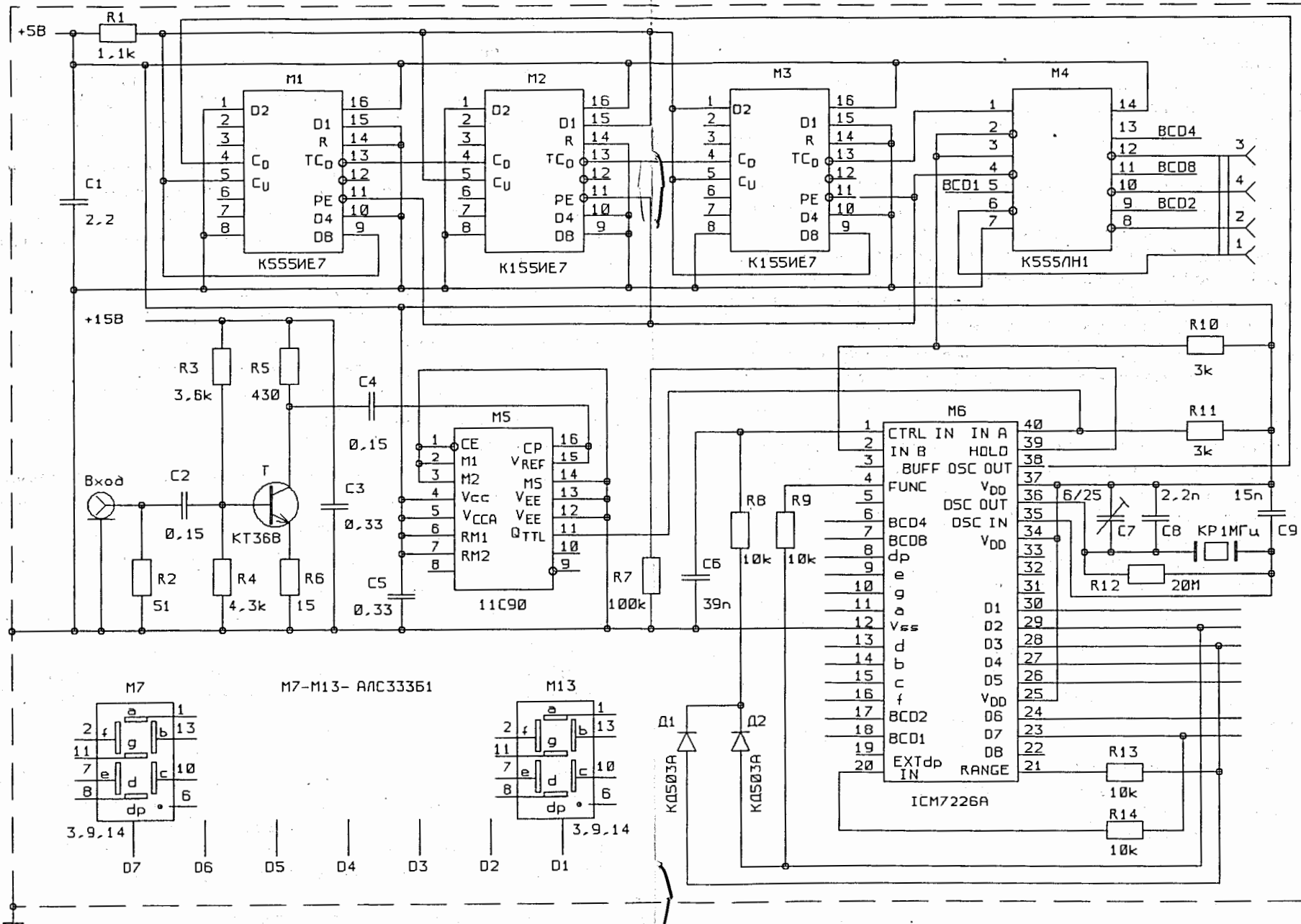
Цифровое табло частотомера состоит из семи светодиодных одноразрядных цифровых индикаторов с запятой. Эти индикаторы (M7—M13) подключены непосредственно к соответствующим выводам M6. Возможность подключения восьмого индикатора не используется: семи цифр для отображения  $B_0$  достаточно.

Описываемый частотомер разрабатывался, в частности, для магнитометра, который при измерении  $B_0$  может работать в автоматическом режиме без каких-либо ручных настроек и регулировок. Поэтому и в частотомере его режимы выбраны такими, чтобы без переключений количеством значащих цифр в индицируемом числе обеспечивалась достаточная точность отображения  $B_0$ , начиная приблизительно с 0,05 Тл — обычного для указанных магнитометров нижнего предела измерения  $B_0$ .

В режиме измерения отношения частот количество индицируемых цифр зависит от величины  $f_A/f_B$  и длительности  $t_c$  строб-импульса, формируемого в M6 из сигнала на входе В. Из характеристик M6 следует, что при  $t_c = 100/f_B = 100K/f_k \approx 0,26$  с в верхней части диапазона  $f_0$  на цифровом табло будет 7 цифр. Так, скажем, при  $f_0 = 100$  МГц табло покажет величину  $B_0$ , равную 2,348740 Тл. Деление  $f_B$  на 100 внутри M6 и место запятой устанавливаются связями RANGE—R13—D3 и EXTdp IN—R14—D7 соответственно. Время, через которое наступает смена индицируемого числа при изменяющейся частоте  $f_0$ , приблизительно 0,5 с. Факторами, определяющими это время, являются  $t_c$  и постоянная 0,2 с пауза между измерениями, заложенная во внутреннюю логику работы M6.

В предыдущем тексте ничего не говорилось о некоторых пассивных элементах, имеющихся в схеме. Но в этом нет большой необходимости: это в основном режимные и согласующие резисторы, разделительные и блокирующие конденсаторы, т.е. элементы с простейшими и очевидными функциями. На рисунке не задействованные в микросхемах выводы отмечены короткими линиями.

После того, как частотомер и ядерный магнитометр были объединены в один прибор, появились ожидаемые трудности с устранением помех от частотомера. Помехи были устранены тщательно продуманным монтажом отдель-



ных плат и прибора в целом, экранированием схемы частотомера. Особое внимание при этом уделялось соединениям земляных (нулевых) линий источников питания.

Специальные меры, минимизирующие температурную нестабильность показаний частотомера, не применялись. Однако, как показали испытания, нестабильность оказалась приемлемой —  $6 \cdot 10^{-7} / 1^\circ\text{C}$  в области обычных лабораторных температур.

Несмотря на то, что частотомер разрабатывался для ядерных магнитометров, он пригоден и для измерителей на основе электронного парамагнитного резонанса — ЭПР. Для ЭПР-магнитометров надо только изменить  $K$  и соответствующими связями в Мб установить подходящее количество значащих цифр и место запятой. Было установлено, что можно подобрать такое значение этого  $K$ , которое обеспечивает достаточную точность измерения ЭПР-методом, не нарушая настройку  $f_c$ , сделанную для ядерного магнитометра. Таким образом, описанный частотомер, дополненный переключателем, в пределах своего частотного диапазона может работать как с ЯМР-, так и с ЭПР-магнитометрами.

В заключение автор искренне благодарит В.В.Калининченко, прочитавшего рукопись и сделавшего полезные замечания, а также А.С.Говядинкина, Д.В.Виноградову, Н.Н.Жукова, Г.Г.Казакову, К.В.Каляпкина, Г.П.Лещенко и Н.В.Сергееву за участие в разработке и изготовлении прибора, оформлении технической документации к нему.

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

## 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, Д13-93-222, Дубна, 1993.
5. Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, Р13-96-196, Дубна, 1996.
6. Уитсон Дж. — 500 практических схем на ИС. М.: Мир, 1992.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 октября 1998 года.