

ЦИФРОВОЙ СТАБИЛИЗАТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2013 г. А. Л. Столыпко

Сыктывкарский государственный университет
Россия, 167000, Сыктывкар, Октябрьский просп., 57

E-mail: alsto@syktsu.ru

Поступила в редакцию 11.02.2013 г.

Описан простой цифровой стабилизатор магнитного поля с относительной стабилизацией не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ /сутки.

DOI: 10.7868/S003281621306013X

Долговременная стабильность магнитного поля необходима при длительном накоплении слабых сигналов в методах радиоспектроскопии и магнитной томографии, особенно при использовании постоянных магнитов и электромагнитов при комнатной температуре [1, 2]. Прибор представляет собой недорогую приставку к я.м.р.-магнитометру (типа Ш1-1, Ш1-9) или спиновому генератору и позволяет стабилизировать условия наблюдения резонансных сигналов с точностью порядка ширины линии я.м.р. рабочего вещества датчика магнитометра в данном магнитном поле [2].

Устройство использует серийный квантовый магнитометр Ш1-9 в качестве внешнего преобразователя текущего значения магнитной индукции B в частоту $f_{\text{ямр}}$. Частота $f_{\text{ямр}}$ преобразуется устройством в управляющее напряжение U . Путем сравнения напряжения U с заданным опорным стабилизированным напряжением U_0 формируется сигнал ошибки $U - U_0$. Напряжение ошибки $U - U_0$ преобразуется в ток дополнительных компенсирующих магнитных катушек. Работа устройства заключается в том, чтобы в следящем режиме поддерживать в дополнительных катушках ток, который с достаточной точностью компенсирует отклонение текущей величины индукции B от значения B_0 , определяемого опорным напряжением U_0 . Точность компенсации главным образом определяется термостабильностью преобразования $B \rightarrow f_{\text{ямр}} \rightarrow U$ и в основном обеспечивается стабильностью задающего генератора. Даже недорогие современные кварцевые генераторы (типа используемого в данном устройстве ТСО-711А) в комнатных условиях легко обеспечивают долговременную относительную стабильность частоты 10^{-6} и лучше.

Принципиальная схема устройства представлена на рис. 1. Кварцевый генератор M_1 (1.8432 МГц) и двоичные счетчики $M_6 - M_8$ формируют положительный прямоугольный импульс точной дли-

тельности T (интервал счета) для измерения частоты $f_{\text{ямр}}$. Интервал счета может изменяться с кратностью 2 путем подключения к различным выводам ($Q0 - Q3$) двоичного счетчика M_{8-1} .

Синусоидальный сигнал от измерителя магнитной индукции Ш1-9 с частотой $f_{\text{ямр}}$, равной частоте протонного магнитного резонанса в магнитном поле с индукцией B , поступает на усилитель-формирователь M_{12} , который формирует прямоугольный сигнал стандарта т.т.л. Подстройкой коэффициента усиления формирователя M_{12} потенциометром R_1 сигнал приводится к форме меандра. Это необходимо для увеличения частотного диапазона и уменьшения вероятности ложных срабатываний триггеров и счетчиков. Для контроля формы сигнала используется индикатор на триггерах Шмитта M_3 и светодиодах D_1, D_2 . При равной интенсивности свечения этих светодиодов, достигаемой регулировкой потенциометра R_1 , форма прямоугольного сигнала близка к меандру.

D -триггеры M_{4-1}, M_{4-2} по срезу счетного импульса T формируют короткий положительный импульс *Write* для записи состояния двоичных счетчиков M_{9-1}, M_{9-2} в регистр M_5 . Тот же импульс с задержкой ~ 20 нс (линия задержки выполнена на логических элементах M_2) используется для сброса счетчиков M_{9-1}, M_{9-2} (*Reset*).

Таким образом в регистр M_5 по окончании каждого интервала счета T записывается число n , соответствующее остатку от деления количества счетных импульсов частоты $f_{\text{ямр}}$, помещающихся в интервале T , на модуль счета 2^m счетчиков M_{9-1}, M_{9-2} :

$$f_{\text{ямр}} T = 2^m N + n,$$

где N – неполное частное от деления количества импульсов $f_{\text{ямр}} T$ на 2^m ; m – разрядность счетчиков M_{9-1}, M_{9-2} (в нашем случае $m = 8$).

При отклонении частоты $f_{\text{ямр}}$ (флуктуации магнитного поля B) на величину $\Delta f_{\text{ямр}}$ от исходного

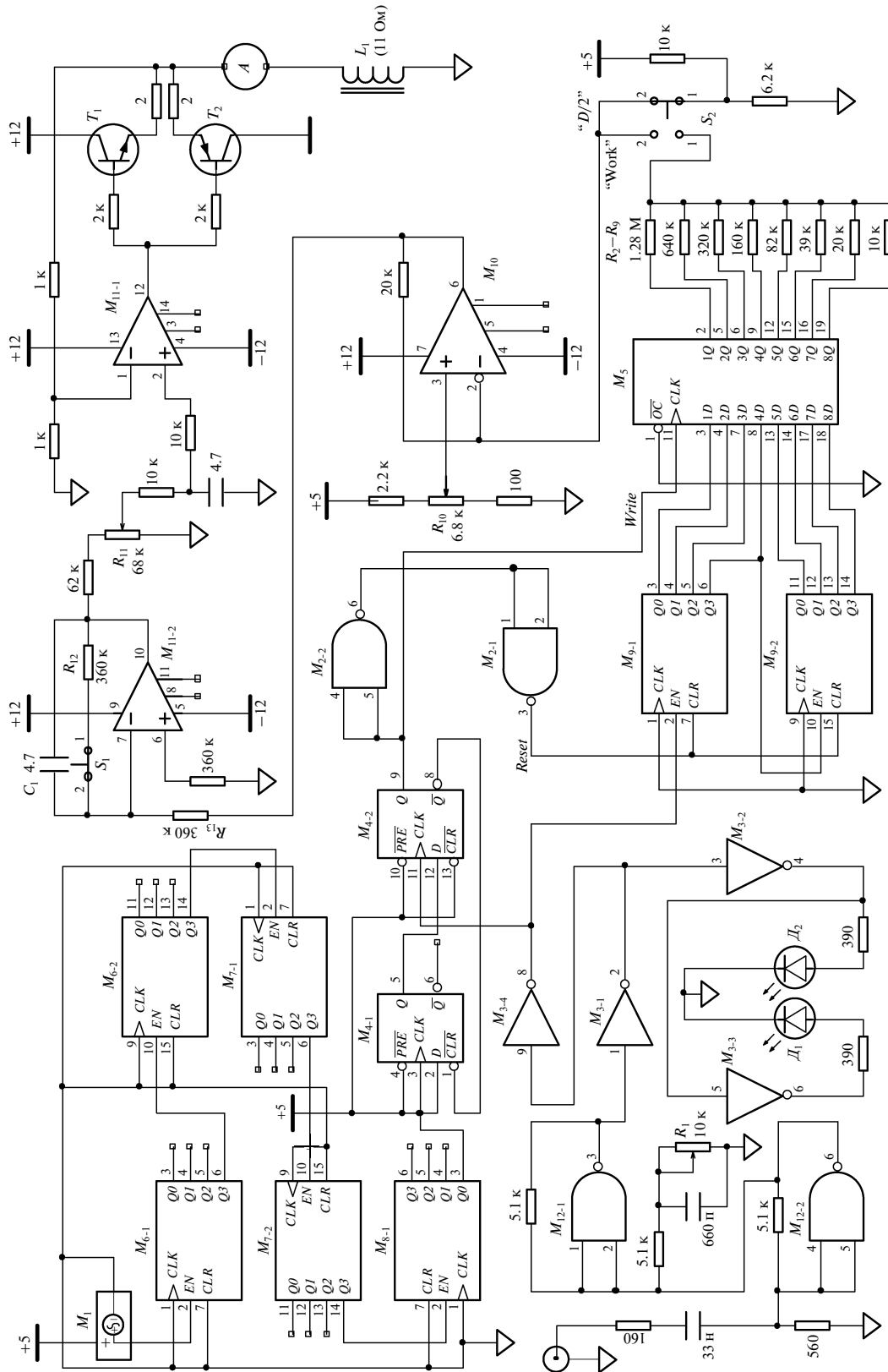


Рис. 1. Схема цифрового стабилизатора магнитного поля. M_1 – ТСО-711А, M_2, M_{12} – 74НС00, M_3 – 74НС14, M_4 – 74НС74, M_5 – 74НС374, M_6 – M_9 – НСF4520, M_{10} – КР140УД608, M_{11} – К140УД20; T_1 – КТ829А, T_2 – КТ853А; D_1, D_2 – АЛ307.

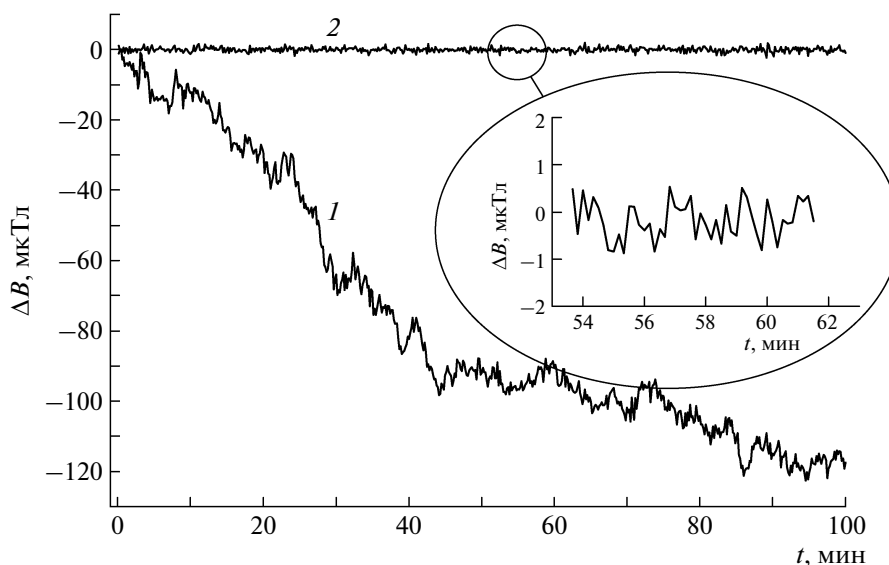


Рис. 2. Зависимость дрейфа магнитного поля электромагнита ΔB от времени ($B = 0.3$ Тл): 1 — после включения источника питания с коэффициентом стабилизации по току 10^{-4} ; 2 — при тех же условиях одновременно с источником тока включается цифровой стабилизатор магнитного поля.

значения остаток n соответственно изменяется на Δn . Очевидно $\Delta n = \Delta f_{\text{ямр}} T$, а поскольку $T = 2^k / f_q$ (где k — суммарная разрядность счетчиков M_6 – M_8 , f_q — частота кварцевого генератора M_1), то $\Delta f_{\text{ямр}} = \Delta n f_q / 2^k$. Например, в нашем случае изменению Δn на единицу соответствует изменение частоты $f_{\text{ямр}}$ на $\Delta f_{\text{ямр}} \approx 1.8$ Гц.

Цифроаналоговый преобразователь (ц.а.п.), построенный на регистре M_5 и резисторах R_2 – R_9 , преобразует значение остатка n в напряжение. Диапазон линейного изменения напряжения U на выходе ц.а.п. в частотных единицах соответствует величине $\Delta f_{\text{ямр}} 2^m$ (в нашем случае ~ 460 Гц). В пределах данного диапазона изменением напряжения U_0 потенциометром R_{10} можно изменять индукцию магнитного поля B_0 с дискретностью $\Delta f_{\text{ямр}} \gamma$ (γ — гиромангнитное отношение для протона). При приближении к границам диапазона на величину амплитуды частотного шума измерителя магнитной индукции $\delta f_{\text{ямр}}$ возможен перескок величины магнитного поля в соседние диапазоны, сопряженные с частотами

$$f_{\text{ямр}} = [(N \pm 1) \cdot 2^m + n] / T.$$

Внутри частотного интервала шириной $2^m \Delta f_{\text{ямр}} - 2\delta f_{\text{ямр}}$ (полосы захвата) значение магнитного поля стабилизировано.

Напряжение с ц.а.п. U поступает на компаратор M_{10} и сравнивается с опорным напряжением U_0 , задаваемым потенциометром R_{10} . Сигнал ошибки $U - U_0$ с компаратора M_{10} через интегратор M_{11-2} поступает на преобразователь напряжение–ток (M_{11-1} , T_1 , T_2). Величина входного сигнала опера-

ционного усилителя M_{11-1} устанавливается потенциометром R_{11} , а постоянная времени интегратора — подбором C_1 , R_{12} , R_{13} .

Кнопка S_1 служит для сброса интегратора, а переключатель S_2 позволяет выбрать один из двух режимов работы: либо подать на вход компаратора напряжение, соответствующее середине полосы захвата $f_{\text{ямр}} 2^m$ (для данного устройства режим “D/2” соответствует $U = +2$ В), либо соединить компаратор с выходом ц.а.п. (режим “Work”).

Настройка начального тока компенсационной катушки производится при положении переключателя S_2 “D/2”. Потенциометром R_{10} устанавливается нулевой ток через катушку L_1 .

Затем переключатель S_2 переводится в режим “Work” и потенциометром R_{11} устанавливается максимальное усиление сигнала ошибки на входе операционного усилителя M_{11-1} , при котором еще не достигается граница возникновения автоколебаний тока компенсации. Ток через компенсационную катушку и наличие автоколебаний контролируются с помощью миллиамперметра A . В режиме “Work” в пределах полосы захвата величину магнитного поля B_0 можно регулировать потенциометром R_{10} .

Сигнал ошибки формируется с использованием высокостабильного кварцевого генератора, что позволяет достигнуть коэффициента долговременной относительной стабилизации магнитного поля 10^{-6} и выше. Кроме того, с указанной точностью может быть воспроизведено установленное значение поля при каждом последующем включении устройства. При увеличении разряд-

ности счетчиков M_{9-1} , M_{9-2} и ц.а.п. возможно также формирование медленной воспроизводимой развертки поля (в пределах полосы захвата) с управлением от персонального компьютера.

Результат работы компенсатора представлен на рис. 2. Кривая 1 соответствует временной зависимости отклонения ΔB величины магнитной индукции B от первоначально установленной B_0 начиная от момента включения источника питания электромагнита ($B_0 = 0.3$ Тл). Кривая 2 показывает работу цифрового стабилизатора магнитного поля.

Технические характеристики устройства: диапазон изменения индукции магнитного поля B определяется выбором я.м.р.-магнитометра, в нашем случае (Ш1-9) диапазон от 25 до 2500 мТл; входной сигнал (с выхода магнитометра) не менее 50 мВ; полоса захвата — до 8 мТл; кратковременная относительная стабилизация B не хуже $2 \cdot 10^{-6}$ мин $^{-1}$, долговременная — не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ сутки $^{-1}$ (для усредненного по интервалу времени 10 мин значения B); напряжения питания: +5 В, ± 12 В; потребляемая мощность 5 Вт.

Устройство эксплуатировалось в течение двух лет в составе импульсного спектрометра я.м.р. широких линий для наблюдения сигналов двойных резонансов (например, акустического и электрического насыщения я.м.р. [3]). Регистрация формы линий двойных резонансов требует точного поддержания резонансных условий в течение длительного времени накопления сигнала. Устройство, как показала практика, позволяет получать спектры двойных резонансов с надежной воспроизводимостью и полностью автоматизировать данную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fukushima E., Roeder S.B.W.* Experimental Pulse NMR: A nuts and bolts approach. Perseus Books Publishing, USA, 1981.
2. *Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В.* Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Физматлит, 1972.
3. *Столышко А.Л., Герр В.В.* // ФТТ. 1997. Т. 39. Вып. 2. С. 246.