

К. Ш. ИБРАГИМОВ, В. А. ЛАРИОНОВ, М. А. ФЕДОТОВ,
А. М. ЩЕРБАЧЕНКО
(Новосибирск)

ПОЛЕВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОТОННЫЙ МАГНИТОМЕТР С ЦИФРОВЫМ ОТСЧЕТОМ В ГАММАХ

Одним из видов квантовых магнитометрических приборов являются протонные магнитометры (ПМ), которые позволяют довольно простыми средствами производить абсолютные прецизионные измерения магнитных полей. В сущности, — это измерители частоты сигнала свободной прецессии моментов ядер вещества датчика, который является прецизионным преобразователем напряженности магнитного поля в частоту. Константа преобразования — гиромангнитное отношение — для данных ядер не зависит от внешних условий и вещества датчика с погрешностью 10^{-5} , а при определенном веществе стабильна до нескольких единиц шестого знака. Ее абсолютное значение для атомов водорода известно с точностью $3 \cdot 10^{-6}$ [1]. Эти особенности обусловили широкое применение ПМ в геофизике, геологии, метрологии, археологии и других областях науки и техники.

В настоящее время имеется много отечественных и зарубежных разработок ПМ [1—3]. В зависимости от назначения ПМ требования к ним меняются в широких пределах. Известные отечественные разработки ПМ имеют ряд недостатков (большие габариты, вес, потребление энергии, неудобства эксплуатации), которые затрудняют применение этих приборов для полевых измерений магнитного поля Земли. Использование новых принципов построения отдельных узлов прибора и современной элементной базы позволяет значительно улучшить технико-экономические и эксплуатационные данные полевого ПМ.

В настоящей статье описан ПМ с цифровым отсчетом в единицах измерения магнитного поля — γ , основные узлы которого: усилитель и счетно-вычислительный блок (СВБ) — выполнены на интегральных схемах. В состав ПМ входят: датчик, блок управления (БУ), усилитель сигнала, СВБ и источник питания.

Датчик ПМ представляет собой сосуд с протонсодержащей жидкостью, на котором намотана катушка, имеющая порядка 1000 витков, настраиваемая в резонанс с сигналом прецессии в полосе частот 0,7—4,5 кГц. Высокая помехозащищенность датчика достигается за счет выполнения его в виде двух катушек, включенных навстречу, симметричного подключения их ко входу усилителя, повышения добротности катушек и экранировки.

Блок управления осуществляет подключение концов обмотки датчика к источнику постоянного тока на время поляризации. В течение этого времени во избежание перегрузки входы усилителя закорочены на общую шину. После поляризации БУ производит подключение концов обмотки датчика ко входу усилителя на время, необходимое для предварительного усиления сигнала датчика, получения результата измерения и его индикации.

Основная трудность при создании усилителя заключается в том, чтобы при достаточно высоком входном сопротивлении усилителя был обеспечен низкий уровень собственных шумов. Задача эта, однако, несколько облегчается тем, что диапазон рабочих частот усилителя лежит в области наименьших собственных шумов планарных транзисторов. Низкий уровень входных сигналов усилителя (1—10 мкВ) требует достижения высокого коэффициента усиления, так как для устойчивой

работы СВБ необходимо иметь сигнал не менее 1—3 В. Вместе с тем уровень выходного сигнала не должен сильно изменяться за время измерения 1000 периодов входного сигнала, в то время как этот сигнал на выходе датчика экспоненциально затухает. Указанные задачи решены в усилителе, принципиальная схема которого изображена на рис. 1.

Входная часть усилителя собрана на транзисторах КТ 315. Для обеспечения высокого входного сопротивления транзистор T_1 включен по схеме эмиттерного повторителя, второй транзистор T_2 — по схеме с общим эмиттером. Для обеспечения малого уровня шумов понижено напряжение питания и выбран оптимальный ток коллектора транзистора T_1 .

Основной коэффициент усиления получается за счет использования двух операционных усилителей 1УТ 402Б и 1УТ 401Б, работающих в качестве масштабных усилителей. Рабочая полоса частот усилителя обеспечивается включением двух фильтров верхних и нижних частот. Фильтры верхних частот (ФВЧ) и нижних частот (ФНЧ) собраны на гибридных микросхемах 2УЭ 841, которые обладают высоким входным сопротивлением и малым уровнем шумов. ФНЧ рассчитан на частоту среза 700 Гц при крутизне среза не менее 12 дБ на октаву и динамическом диапазоне 80 дБ. ФВЧ имеет частоту среза 4,5 кГц при аналогичных характеристиках. Дополнительную крутизну среза обеспечивают каскады на операционных усилителях благодаря подбору корректирующих емкостей. Общий коэффициент усиления усилителя равен 10^6 . Усилитель полностью экранируется. Выход рассмотренного усилителя подключается ко входу выходного каскада, выполненного по схеме с общим эмиттером. Этот каскад, как и следующие за ним эмиттерный повторитель и триггер Шмитта, монтируется на отдельной плате с целью уменьшения влияния выходного сигнала на входные цепи и устранения возможности возбуждения.

Прежде чем приступить к рассмотрению структурной схемы СВБ магнитометра, отметим, что основными особенностями сигнала датчика являются низкая выходная частота и сравнительно малое время существования сигнала, не превышающее нескольких секунд. Эти особенности частотного сигнала приводят к тому, что при определении магнитного поля с погрешностью 10^{-5} производят измерение не менее 1000 периодов входного сигнала (при частоте опорного генератора 1 МГц), а затем определяют значение напряженности магнитного поля в соответствии с выражением

$$H = \frac{234874}{N_T} 10^5, \quad (1)$$

где N_T — число в микросекундах, соответствующее измеренному значению 1000 периодов сигнала датчика. Особенности измерения фиксированного числа периодов сигнала датчика и анализ ошибок сделаны в [1, 2] и более подробно в [4] и поэтому в данной статье не рассматриваются.

Вычисление значения магнитного поля обычно производят либо с помощью таблиц-номограмм, либо специализированных вычислительных устройств. При работе в полевых условиях желательно, чтобы протонный магнитометр обеспечивал представление результата в абсолютных единицах измерения, причем вычислительное устройство должно быть максимально простым.

Эта задача может быть успешно решена с помощью СВБ, в основу которого положена схема цифрового интегратора с последовательным переносом. Структурная схема СВБ, изображенная на рис. 2, соответствует схеме цифрового частотомера с цифровым интегратором [5]. Пуск СВБ происходит в момент окончания поляризации при установке триггера T_1 сигналом формирователя импульса Φ_1 в состояние «1». При

В общем виде результат умножения на цифровом интеграторе числа импульсов N_2 на коэффициент N_1/N_m можно записать как

$$N_3 + \Delta N_3 = \frac{N_1}{N_m} N_2, \quad (4)$$

где ΔN_3 — погрешность умножения цифрового интегратора; N_3 — результат умножения на идеальном множителе.

Учитывая тот факт, что в рассматриваемом СВБ умножение числа импульсов, поступающих от ГТЧ в счетчик $S_{ч2}$, на коэффициент N_1/N_m ведется до получения постоянного числа N_3 , выражение (4) для цифрового интегратора можно переписать в виде

$$N_3 = \frac{N_1}{N_m} (N_2 \pm \Delta N_2), \quad (5)$$

где ΔN_2 — погрешность частного при делении числа N_3 на коэффициент $k = \frac{N_1}{N_m}$.

Из выражений (4) и (5) следует, что погрешность умножения цифрового интегратора можно записать в виде

$$\Delta N_3 = \frac{N_1}{N_m} \Delta N_2.$$

В таблице представлены результаты умножения на двоичном цифровом интеграторе числа импульсов ΔN_2 на коэффициент k .

k	ΔN_2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,325	0	1	1	1	1	2	2	3	3	4
0,375	0	1	1	2	2	3	3	3	3	4
0,5	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
0,75	1	2	3	3	4	5	6	6	7	8

Пользуясь формулой (4) и таблицей, можно определить максимально возможную погрешность $q = \Delta N_2$ вычисления частного с помощью схемы СВБ, изображенной на рис. 2.

Максимально возможная погрешность умножения двадцатирядного двоичного множителя, составляющего основу СВБ и обеспечивающего вычисление напряженности магнитного поля с дискретностью 0,1 γ в диапазоне 30—70 тыс. γ , не превышает 4 единиц. Следовательно, максимально возможная погрешность вычисления частного, как следует из таблицы, не превышает 10 единиц или 1 γ .

Эта погрешность может быть сведена до величины, равной p/q ($p \geq q$), увеличением в p раз числа, фиксируемого в счетчике $S_{ч3}$, и делением результата вычисления в счетчике $S_{ч2}$ в p раз, т. е. простым увеличением разрядности счетчиков $S_{ч2}$ и $S_{ч3}$.

Рассмотренный СВБ собран на микросхемах 155 серии и обеспечивает вычисление значения напряженности в диапазоне 30—70 тыс. γ . Результат вычисления фиксируется двоично-десятичным счетчиком $S_{ч4}$ и после дешифрации индицируется отсчетным устройством ОУ.

Технические характеристики макетного образца, разработанного магнитометра, испытанного в полевых условиях, показывают возможность создания прибора со следующими характеристиками: диапазон измерения напряженности магнитного поля 30—70 тыс. γ ; погрешность

измерения менее 1 γ ; дискретность отсчета 0,1 γ ; продолжительность цикла измерений 4 ± 1 с; отсчет цифровой на индикаторных лампах ИИ-14; потребляемая мощность питания измерительного блока менее 5 Вт; средняя потребляемая мощность питания магнитометра менее 20 Вт; вес: датчика 3,2 кг, источника поляризации 4 кг, измерительного блока 2 кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Бородин и др. ЯМР в земном поле. Л., Изд. Ленингр. ун-та, 1967.
2. Н. П. Померанцев и др. Физические основы квантовой магнитометрии. М., «Наука», 1972.
3. Магнитометр протонный М-32.— В кн.: Каталог геофизической аппаратуры. Л., «Недра», 1973.
4. М. А. Федоров, Д. А. Нагорский. О погрешностях протонного магнитометра, построенного по схеме периодометра.— Геомagnetизм и аэрономия, 1971, т. 11, № 4
5. И. Ф. Клисторин, А. М. Щербаченко. Быстродействующий цифровой частотомер низких и инфранизких частот.— Автометрия, 1970, № 2.
6. Ян Си-зен. Определение максимальной погрешности двоичного умножителя.— Автоматика и телемеханика, 1960, т. 21, № 7.

*Поступила в редакцию 15 февраля 1974 г.;
окончательный вариант — 25 апреля 1974 г.*

УДК 681.142.2

**В. М. БЕЛОВ, В. А. БУРОВЦЕВ, К. Ш. ИБРАГИМОВ,
А. Е. ПОДЗИН**
(Новосибирск)

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ВХОДНОЙ ЯЗЫК СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ БИС ЗУ

Эффективность использования ЭВМ в автоматизированных системах контроля (АСК) сложных функциональных радиоэлектронных схем в значительной степени зависит от удобств организации обмена информацией между оператором и ЭВМ, которые определяются как возможностями используемых терминалов, так и степенью развитости входного языка системы. Особенности функционирования таких АСК, заключающиеся в необходимости управления большим числом программируемых внешних устройств (ВУ), требуют разработки алгоритмического языка, ориентированного специально для задач управления и оперативной обработки контрольно-измерительной информации. Программа на входном языке должна в компактной форме описывать все операции обращения к ВУ и алгоритмы простейшей обработки получаемых данных, направленные как на логическое решение задачи о правильности функционирования контролируемого объекта, так и определение его предельных характеристик.

В настоящей статье описывается входной язык, разработанный специально для решения задач управления и обработки данных в системе контроля больших интегральных схем запоминающих устройств (БИС ЗУ) [1]. При разработке языка были использованы широко распространенные в контрольно-измерительной и вычислительной технике термины и обозначения.

Специализированные алгоритмические языки для задач управления и контроля, по нашему мнению, должны удовлетворять следующим основным требованиям.