

Сибирское отделение Академии наук России  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

Г.В. Карпов, А.С. Медведко, Е.И. Шубин

ПРЕЦИЗИОННЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ  
НА ОСНОВЕ ЯМР  
В СТАНДАРТЕ VME

ИЯФ 2004-55

Новосибирск  
2004

## **Прецизионные магнитометры на основе ЯМР в стандарте VME**

*Г.В. Карпов, А.С. Медведко, Е.И. Шубин*  
Институт ядерной физики, 630090 Новосибирск, РФ

### **Аннотация**

Описаны прецизионные многоканальные магнитометры на основе импульсных методов ЯМР, выполненные в стандарте VME. Описан принцип работы магнитометров, представлены функциональные схемы и особенности построения двух типов магнитометров, даны основные параметры датчиков ЯМР. Приведены основные источники погрешностей измерения магнитного поля, показана связь этих погрешностей с параметрами измеряемого поля, параметрами датчика и параметрами отдельных функциональных частей магнитометра. Приведены полученные результаты.

## **Precise magnetometers on base of NMR in VME standard**

*G.V. Karpov, A.S. Medvedko, E.I. Shubin*  
Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, RF

### **Abstract**

The precise multi-channel magnetometers based on pulsed NMR technique in VME standard are described. The operational principle, functional schemes, the magnetometer building features and the main NMR probe parameters are presented. The main sources of measurement errors are described. The connection of these errors with measuring field parameters, probe parameters, magnetometer functional parts parameters is shown. The results obtained are presented.

---

## 1. Введение

В конце 80-х гг. для решения задач прецизионных измерений постоянных магнитных полей в ИЯФ был разработан магнитометр на основе импульсных методов ЯМР в стандарте САМАС [1,2]. До середины 90-х гг. было изготовлено около 10 магнитометров в стандарте САМАС, которые успешно работали и работают в ИЯФ и других научных центрах в России и за рубежом. Ряд новых задач, появившихся к концу 90-х гг. потребовал разработки прецизионного ЯМР магнитометра с более широким диапазоном возможностей, способным решать такие задачи, как измерения магнитных полей при сверхнизких температурах, а также измерения полей с градиентами порядка 100 Гс/см.

В конце 90-х гг. были разработаны два варианта ЯМР магнитометра нового поколения в стандарте VME. Один из этих вариантов магнитометра предназначен для работы с датчиками на основе твердых рабочих веществ, в том числе металлических, способных измерять магнитные поля при температуре жидкого гелия [3].

Магнитометры в стандарте VME способны измерять постоянные магнитные поля в диапазоне  $0.03 \div 13$  Т, погрешность относительных измерений однородного поля не превышает  $10^{-6}$  при комнатной температуре и  $2 \times 10^{-6}$  при температуре жидкого гелия. Прибор имеет блочно-модульную конструкцию и состоит из набора функциональных VME-модулей.

## 2. Принцип работы ЯМР магнитометра

Работа всех ЯМР магнитометров основана на измерении тем или иным способом ларморовской частоты прецессии ядер в магнитном поле, связанной с индукцией поля  $B$  через гиромангнитное отношение  $\gamma$ , являющееся свойством данного типа ядер:  $\omega_{ЛР} = \gamma \cdot B$ . В основе описываемых магнитометров лежит широко применяемая в ЯМР спектроскопии импульсная методика, представленная на Рис.1.

Методика заключается в воздействии на ядра, содержащиеся в образце, радиочастотными (РЧ) импульсами: 90-градусным и 180-градусным с последующей регистрацией либо сигнала спада свободной индукции (ССИ), либо сигнала “спинового эха” [4]. Длительность сигналов, оказывающая большое влияние на точность измерений поля, определяется двумя факторами: поперечной релаксацией, обусловленной взаимодействием спинов ядер друг с другом и с решеткой, и разбросом частот прецессии ядер в объеме образца, вызванным неоднородностью магнитного поля.

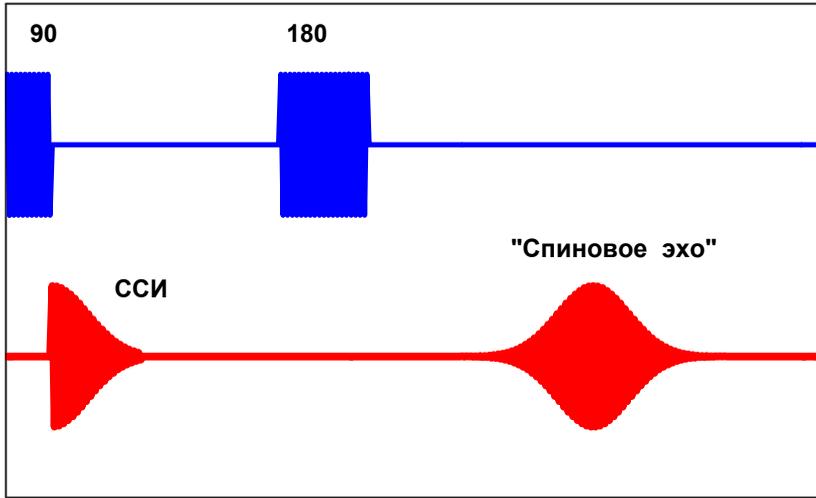


Рис. 1. Базовая методика ЯМР.

На Рис.2 представлена упрощенная функциональная схема магнитометра. Основными функциональными частями магнитометра являются: датчик, приемный тракт, передающий тракт, прецизионный Синтезатор частот, АЦП и устройство управления. Поскольку катушка датчика используется и для возбуждения спинов, и для приема сигнала, в процессе работы она поочередно подключается либо к выходу передающего тракта, либо ко входу приемного тракта. Во время возбуждения РЧ импульсы с частотой Синтезатора  $F_{СИНТ}$  и амплитудой порядка нескольких десятков вольт поступают на катушку датчика.

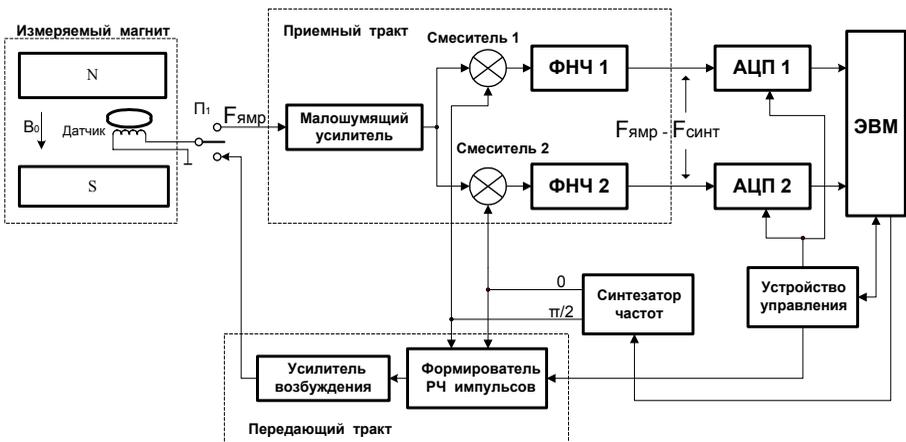


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема ЯМР магнитометра.

Во время приема сигнал с частотой свободной прецессии ядер  $F_{ЯМР}$  и амплитудой от нескольких микровольт из катушки датчика поступает на вход приемного тракта в малошумящий усилитель.

После усиления частота сигнала переносится в низкочастотную область путем смешивания сигнала с ортогональными напряжениями Синтезатора в двух смесителях. Данная квадратурная обработка позволяет однозначно определять знак отстройки частоты Синтезатора от частоты сигнала ЯМР. Затем две ортогональные компоненты сигнала разностной частоты  $F_P = F_{ЯМР} - F_{СИНТ}$  преобразовываются с помощью АЦП в массивы цифровых кодов. Вся последующая обработка выполняется в цифровом виде во внешней ЭВМ (которой обычно является интеллектуальный контроллер крейта). Конечным результатом обработки сигнала является модуль и знак разностной частоты  $F_P$ . Частота ЯМР находится как сумма этой разностной частоты и частоты Синтезатора:  $F_{ЯМР} = F_P + F_{СИНТ}$ .

В магнитометре можно выделить два основных режима работы: режим измерения и режим поиска сигнала ЯМР. Необходимость режима поиска обусловлена узостью полосы пропускания приемного тракта, равной удвоенной частоте среза ФНЧ и составляющей порядка  $10^{-4}$  от рабочего диапазона частот магнитометра. В данном режиме осуществляется сканирование частотой Синтезатора и грубое нахождение частоты ЯМР. В режиме измерения частота ЯМР определяется с максимальной точностью, а частота Синтезатора находится вблизи частоты ЯМР и следует за ней при изменении магнитного поля.

Для повышения отношения сигнала к шуму в магнитометре реализовано “накопление сигнала” – суммирование (на цифровом уровне)  $N$  однократно зарегистрированных сигналов ЯМР. Цифровая обработка выполняется уже для “накопленного” сигнала. Организация полного цикла измерения показана на Рис.3.

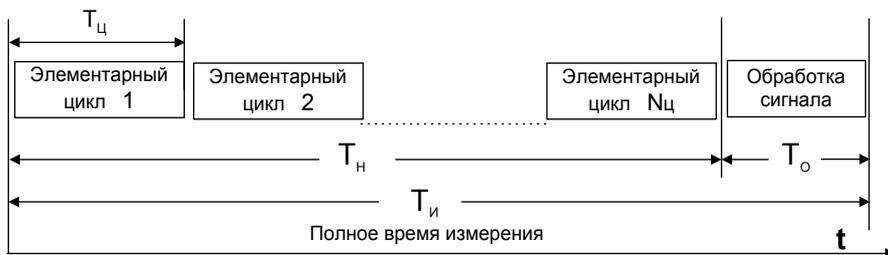


Рис. 3. Организация полного цикла измерения.

Полный цикл измерения включает в себя две стадии: стадию накопления сигнала и стадию цифровой обработки. На стадии накопления осуществляется суммирование  $N_{ц}$  массивов сигналов, каждый из которых

получен в течении одного “элементарного цикла”. В результате накопления сигнала отношение сигнала к шуму возрастает примерно в  $\sqrt{N_{Ц}}$  раз.

Важным параметром магнитометра является “мертвое время” приемного тракта – промежуток времени по окончании РЧ импульса, необходимый приемному тракту для восстановления своей способности принимать и усиливать сигналы ЯМР. “Мертвое время” приемного тракта приводит к потере части энергии сигнала ССИ (Рис.4).

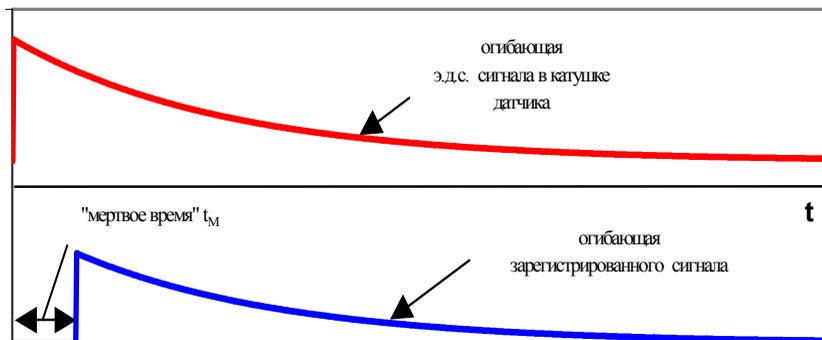


Рис. 4. Влияние “мертвого времени” приемного тракта на энергию зарегистрированного сигнала ССИ.

### 3. Датчики ЯМР

Датчики ЯМР различаются: типом рабочего вещества, электрической схемой, габаритами образца и корпуса. В зависимости от электрической схемы датчики бывают нерезонансными (Рис.5,а), и резонансными с различными схемами включения контура (Рис.5,б,в).

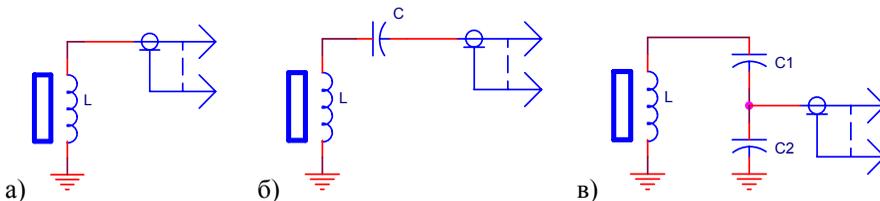


Рис. 5. Электрические схемы датчиков ЯМР.

Нерезонансные датчики используются наиболее часто, поскольку способны перекрывать наибольший диапазон полей одним датчиком.

В Таблице 1 представлены основные параметры рабочих веществ датчиков ЯМР.

Таблица 1. Основные параметры рабочих веществ датчиков ЯМР

Рабочее вещество	Рабочие ядра	Гиромагнитное отношение $\gamma/(2\pi)$ , МГц/Т	Время продольной релаксации $T_1$ , мс ***	Время поперечной релаксации $T_2$ , мс ***
вода	протоны	42.576396 *	5÷50	5÷50
резина	протоны	42.576268 *	~20 ( $B=0.5T$ )	~0.7
раствор солей лития	ядра лития ${}^7\text{Li}$ и протоны	16.54646 **	~1000	~1000
“тяжелая” вода	дейтерий	6.53569 *	~1000	~1000
порошок металлического алюминия $T = 4.2 \text{ К}$	Ядра алюминия ${}^{27}\text{Al}$	11.0942 **	~30	~0.04
порошок металлической меди $T = 4.2 \text{ К}$	Ядра изотопа меди ${}^{63}\text{Cu}$	11.2944 **	~30	~0.05
фторопласт	Ядра фтора ${}^{19}\text{F}$	40.0546 *	~30	~0.09

\* Значения гиромагнитного отношения для данных ядер взяты из [5].

\*\* Значения гиромагнитного отношения для данных ядер взяты из [6].

\*\*\* Значения времен релаксации  $T_1$ ,  $T_2$  измерены авторами. Времена релаксации для воды приведены с учетом добавления в нее парамагнитной соли.

Гиромагнитные отношения приведены с учетом так называемых химических сдвигов [5]. Время поперечной релаксации  $T_2$  является характерной постоянной времени, с которой затухает сигнал ССИ вследствие взаимодействия спинов друг с другом и с решеткой в однородном поле [8]. Время поперечной релаксации влияет на длительность сигнала и определяет собственную ширину резонанса рабочего вещества:

$\Delta F_0 \cong 1/T_2$ . Время продольной релаксации  $T_1$  является характерной постоянной времени, с которой устанавливается стационарная ядерная намагниченность вещества. Время продольной релаксации определяет темп накопления сигнала.

Из веществ, представленных в таблице, вода обеспечивает наибольшее отношение сигнала к шуму. Резина, в которой рабочими ядрами также являются протоны, имеет существенный недостаток – малое время поперечной релаксации  $T_2$ , что значительно уменьшает точность измерений однородных полей. Порошки металлического алюминия и металлической меди используются для измерения магнитных полей при сверхнизких температурах.

#### 4. Электроника ЯМР магнитометра

ЯМР магнитометры в стандарте VME можно разделить на два типа (см. Табл.2).

Таблица 2. Два типа ЯМР магнитометров

Тип магнитометра	1	2
“Мертвое время”, мкс	100	3÷5
Частота среза ФНЧ, кГц	3÷10	120
Длительности сигналов ССИ, при которых применяются, мс	более 0.5	0.01÷1

Магнитометры первого типа имеют мертвое время порядка 100 мкс и полосу пропускания, равную удвоенной частоте среза ФНЧ, от 7 до 20 кГц. Данные типы применяются, когда характерная длительность сигналов ССИ превышает 0.5 мс. Второй тип магнитометров имеет мертвое время порядка нескольких мкс, полосу 240 кГц и применяется в случаях, когда характерная длительность сигналов ССИ составляет от десяти микросекунд до миллисекунды. На Рис.6 представлена блок-схема 12-канального ЯМР магнитометра первого типа.

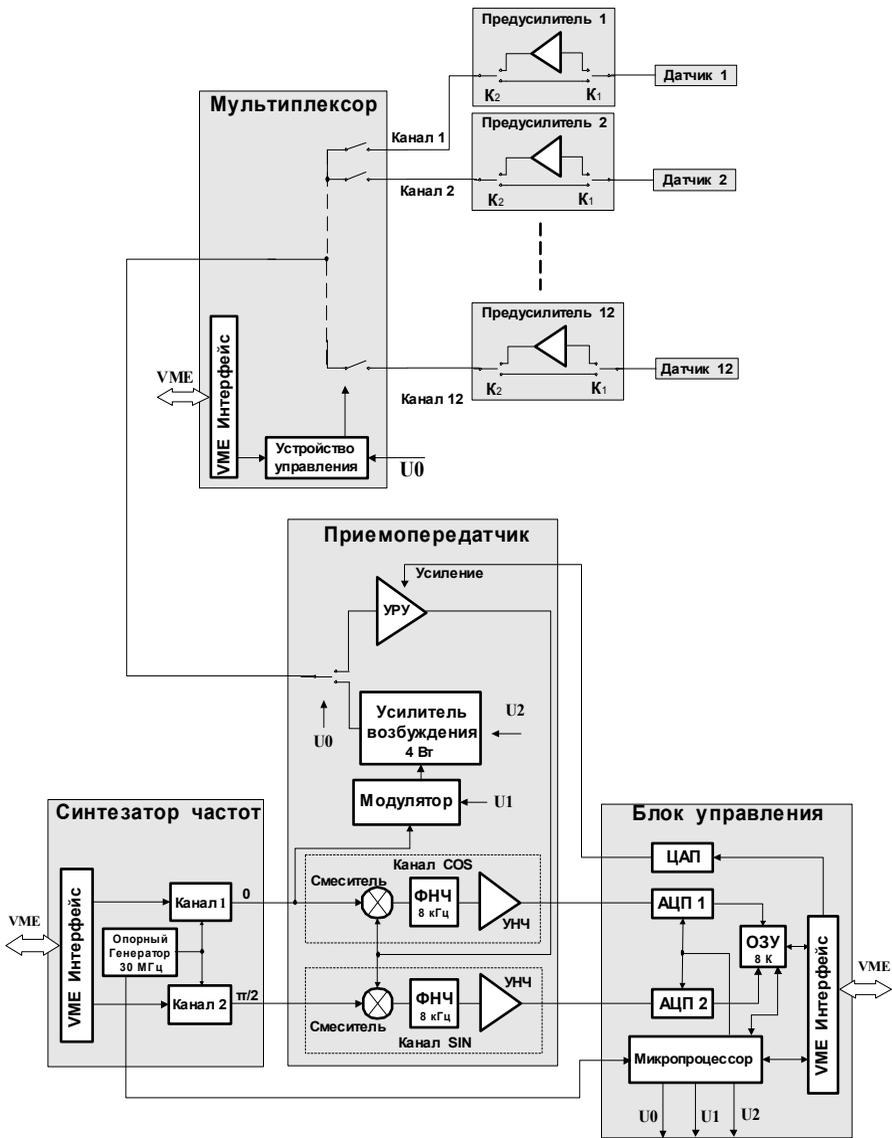


Рис. 6. Блок-схема 12-канального ЯМР магнитометра первого типа.

Магнитометр состоит из Предусилителей, датчиков и четырех модулей VME: Приемопередатчика, Синтезатора частот, Блока управления, Мультиплексора. Рассмотрим отдельные функциональные части магнитометра.

**Передающий тракт** включает в себя формирователь РЧ импульсов (Модулятор) и Усилитель возбуждения с максимальной выходной мощностью около 4 Вт. Усилитель возбуждения представляет собой усилитель класса А, выходные каскады Усилителя отпираются только на время прихода РЧ импульсов.

**В приемном тракте** магнитометра сигнал ЯМР, идущий из датчика, усиливается примерно на 120 дБ: ~80 дБ на высокой частоте и ~40 дБ на низкой частоте. Усиление на высокой частоте распределено между двумя усилителями: Предусилителем и Усилителем с регулировкой усиления (УРУ). Предусилитель расположен рядом с измеряемым магнитом на минимально возможном расстоянии от датчика. Каждый датчик имеет свой Предусилитель. Вход Предусилителя коротким (обычно около 1÷3 м) РЧ кабелем соединяется с датчиком. Коэффициент усиления Предусилителя составляет ~40 дБ, полоса — 1 – 150 МГц. С выхода Предусилителя сигнал по коаксиальному радиочастотному кабелю, длина которого может достигать 200 метров и более, поступает на соответствующий вход Мультиплексора и далее – на УРУ. Усиливать сигнал в непосредственной близости от датчика очень важно, поскольку это предотвращает потери в отношении сигнала к шуму, вызванные как затуханием в кабеле, так и возможными наводками на него.

Каждый Предусилитель соединяется с основной аппаратурой магнитометра, размещенной в крейте VME, одним 50-омным РЧ кабелем, через который проходят и усиленный сигнал ЯМР, и РЧ импульсы возбуждения, и сигналы управления ключами  $K_1$ ,  $K_2$ , являющиеся одновременно и напряжениями питания. Знак постоянного напряжения, подаваемого на выход Предусилителя, определяет режим его работы. Картина сигналов на выходе Предусилителя представлена на рис.7.

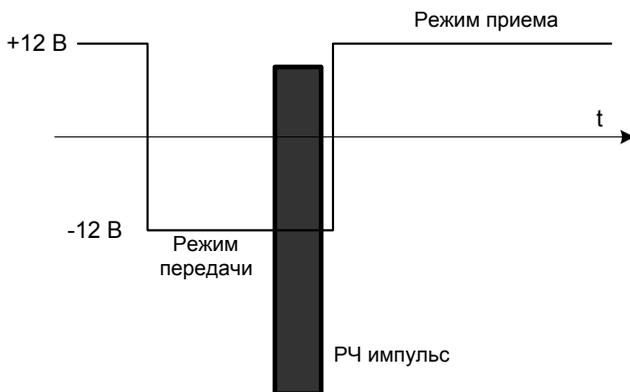


Рис. 7. Сигналы и напряжения на выходе Предусилителя.

Такой вариант построения Предусилителя упрощает реализацию многоканальных измерений, уменьшает количество соединительных кабелей, но увеличивает “мертвое” время, которое в данном случае составляет ~100 микросекунд.

**Блок управления** включает в себя два 12-разрядных АЦП (MAX122) и Программатор импульсов, вырабатывающий логические сигналы управления  $U_0$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ , обеспечивающие переход из режима передачи в режим приема и формирование РЧ импульсов, а также импульсы запуска АЦП  $U_{АЦП}$ . Вид импульсной последовательности, используемой для получения сигнала “спинового эха”, показан на рис.8.

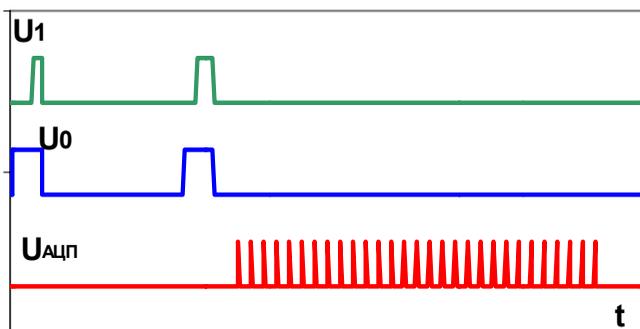


Рис. 8. Вид импульсной последовательности, генерируемой Программатором импульсов.

Вид импульсной последовательности содержится в микропрограмме микропроцессора (тип – AT89S8252 фирмы ATMEL), находящейся в его FLASH памяти. Ряд параметров управляющей импульсной последовательности, таких как длительности РЧ импульсов, интервал времени между РЧ импульсами, время начала выборок АЦП, частота выборок АЦП, количество выборок АЦП, количество накоплений сигнала, длительность элементарного цикла – можно задавать программно. Дискретность временной сетки около 1 мкс. Управляющие сигналы поступают в другие модули VME через соответствующие разъемы на передней панели Блока управления.

**Синтезатор частот** выполнен на основе однокристалльных синтезаторов прямого синтеза AD9851BRS фирмы Analog Devices [9]. Рабочий диапазон частот Синтезатора 0÷145 МГц. Минимальный шаг по частоте составляет 0.04 Гц в диапазоне 0÷72 МГц и 0.08 Гц в диапазоне 72÷145 МГц. Нестабильность частоты Синтезатора, определяемая нестабильностью частоты его опорного кварцевого генератора, составляет около  $5 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ .

**12-канальный Мультиплексор** позволяет проводить измерения полей в двенадцати удаленных друг от друга точках одним комплектом аппаратуры.

Упрощенная функциональная схема Мультиплексора представлена на Рис.9.

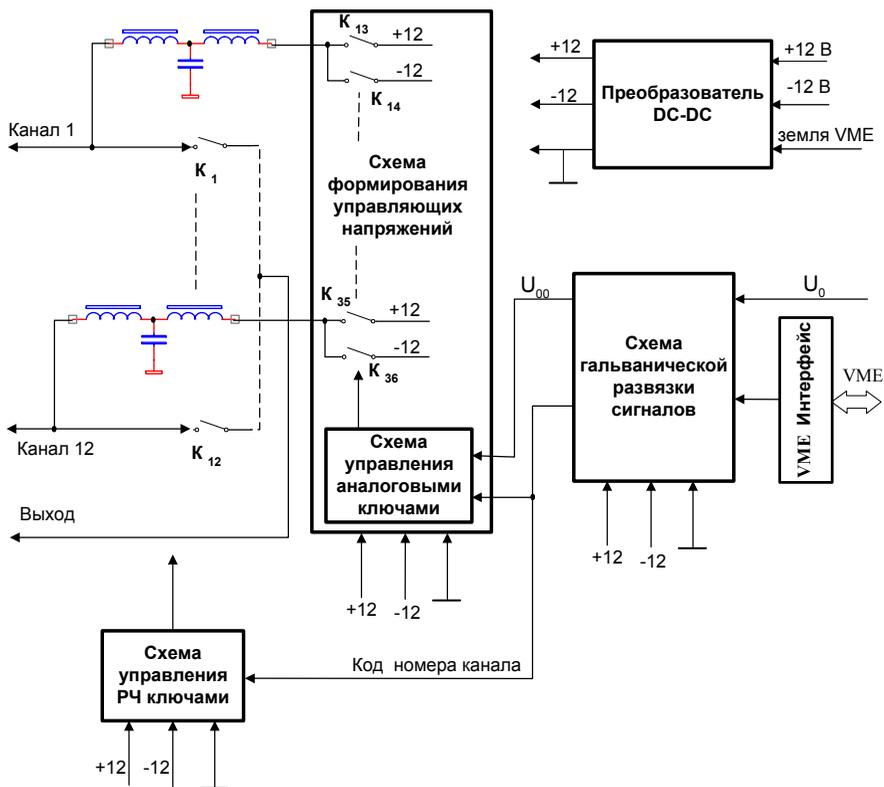


Рис. 9. Упрощенная функциональная схема Мультиплексора.

Радиочастотные сигналы (РЧ импульсы и сигналы ЯМР) коммутируются ключами  $K_1 - K_{12}$ , выполненными на PiN-диодах типа VAR64-03. Номер замкнутого ключа задается кодом номера канала, записываемого в регистр канала по шине VME. Помимо этого в зависимости от стадии работы магнитометра на вход выбранного канала через развязывающий L-C-L фильтр подается постоянное напряжение: +12В в режиме приема и -12 В в режиме передачи (как показано на рис.7). Подача того или иного напряжения на вход выбранного канала обеспечивается аналоговыми ключами  $K_{13} - K_{36}$ , выполненными на микросхемах MAX353. Знак подаваемого напряжения

определяется управляющим логическим сигналом  $U_0$ , приходящим в Мультиплексор из Блока управления через разъем на передней панели.

Общим требованием для всех систем, выполненных в стандарте VME, работающих на электрофизических установках, является отсутствие гальванической связи “земли” VME с металлическими частями установки. Изоляция между “землями” должна выдерживать напряжение до 300÷600В.

Поскольку Предусилители и датчики, как правило, крепятся к поверхностям измеряемых магнитов и имеют гальванический контакт с ними, в Мультиплексоре предусмотрена гальваническая развязка его “внутренней земли”, соединенной с “землями” Предусилителей, от “земли” VME. Напряжение изоляции между “землями” составляет около 1000 В.

Малое “мертвое время” *магнитометров второго типа* обеспечивается, главным образом, за счет более высокого быстродействия РЧ ключей, переключающих датчик с выхода передающего тракта ко входу приемного тракта и наоборот. Время переключения этих ключей составляет около 1 мкс. Платой за это является увеличение числа соединительных кабелей между Предусилителем и остальной частью магнитометра (четыре кабеля вместо одного) и более сложная реализация многоканальных измерений, обусловленная необходимостью коммутации четырех сигналов (вместо одного). Вместо одного модуля Мультиплексора в магнитометре второго типа используется три отдельных модуля. “Мертвое время” приемного тракта определяется не столько временем коммутации диодных РЧ ключей Предусилителя, сколько высокочастотным “звоном” на частоте возбуждения сразу после окончания РЧ импульсов. Высокочастотный “звон” после окончания РЧ импульсов имеет место на выделенных частотах и обусловлен наличием резонансных цепей на входе Предусилителя. Хотя в магнитометрах с малым “мертвым временем” использовались только датчики нерезонансного типа, низкодобротные паразитные резонансы во входной цепи Предусилителя все же имеют место. Несмотря на малую добротность этих резонансов (не более 5÷10), учитывая значительную разницу между уровнем напряжения возбуждения, составляющим 20÷30 вольт, и уровнем сигнала ЯМР, составляющим порядка нескольких микровольт, остаточный “звон” может проявляться даже через несколько микросекунд после окончания РЧ импульсов.

## **5. Точность измерений магнитного поля**

Основные источники погрешностей измерения магнитного поля ЯМР магнитометром представлены на диаграмме на Рис.10. Погрешность относительных измерений поля включает в себя три основных вида погрешностей: случайную погрешность, обусловленную шумами, погрешность из-за нестабильности частоты Синтезатора и погрешность, связанную с нестабильностью формы спектра сигнала. Погрешность

абсолютных измерений помимо этих видов дополнительно включает еще два вида погрешностей. Первая из них – это погрешность из-за неопределенности гиромагнитного отношения ядер с учетом химического сдвига, а также из-за искажений поля, вызванных магнитными свойствами элементов датчика, прежде всего образца. По порядку величины эта погрешность составляет несколько единиц на  $10^{-6}$ . Еще одна погрешность связана с пространственной неопределенностью положения точки измерения, которая по порядку величины составляет около 10% от



неоднородности поля в объеме образца.

Рис. 10. Основные источники погрешностей измерения магнитного поля ЯМР магнитометром.

**Случайная погрешность, вызванная шумами**, характеризуется своим среднеквадратичным значением, отнесенным к времени измерения 1 сек,  $(\sigma_F)_1$ . Среднеквадратичная погрешность  $(\sigma_F)_1$  определяется шириной спектра сигнала  $\Delta F_C$  и отношением сигнала к шуму в спектре при времени накопления 1 сек  $(C/Ш)_1$ :

$$(\sigma_F)_1 \cong \Delta F_C / (C/Ш)_1 . \quad (1)$$

Ширину спектра сигнала  $\Delta F_C$  можно представить в виде суммы собственной ширины резонанса рабочего вещества  $\Delta F_0$  и уширения вследствие разброса частот прецессии ядер образца  $\Delta F_H$ :

$$\Delta F_C \cong \Delta F_0 + \Delta F_H \cong 1/T_2 + \gamma \cdot \Delta B_H / \pi , \quad (2)$$

где  $\Delta B_H$  – интегральная неоднородность измеряемого поля в объеме образца.

Отношение сигнала к шуму в спектре  $(C/Ш)_1$  определяется параметрами измеряемого поля, параметрами датчика и шумовыми параметрами входных каскадов Предусилителя:

$$(C/Ш)_1 \cong (\gamma \cdot \chi_0 \cdot B^2 \cdot V^{1/2} \cdot L^{1/2}) / ((\Delta F_C)^{1/2} \cdot (T_1)^{1/2} \cdot (S_{Ш})^{1/2}) , \quad (3)$$

где  $\chi_0$  – ядерная магнитная восприимчивость рабочего вещества,

$B$  – индукция измеряемого поля,

$V$  – объем рабочего вещества (объем образца),

$L$  – индуктивность катушки датчика,

$T_1$  – время продольной релаксации рабочего вещества,

$S_{Ш}$  – спектральная плотность шума.

Как следует из выражений (1,2,3), среднеквадратичная погрешность  $(\sigma_F)_1$  в значительной степени определяется параметрами измеряемого поля, она уменьшается с увеличением индукции измеряемого поля и с уменьшением градиента поля в точке измерения. Тем не менее, при заданных параметрах измеряемого поля данную погрешность можно уменьшить, оптимизируя некоторые параметры датчика, например, объем образца. Оптимальный объем образца зависит от времени поперечной релаксации вещества и градиента поля в месте измерения. В частности, для жидких рабочих веществ, имеющих большие времена релаксации, среднеквадратичная погрешность  $(\sigma_F)_1$  уменьшается с уменьшением объема образца за счет сужения спектра сигнала, несмотря на уменьшение отношения сигнала к шуму.

Первичными факторами, вызывающими **погрешность измерения из-за нестабильности формы спектра сигнала**, являются нестабильность

амплитуды РЧ импульсов и нестабильность отстройки частоты возбуждения от частоты ЯМР. Данные факторы могут привести к нестабильности формы спектра сигнала только при наличии определенных условий, таких, как неоднородность РЧ поля в объеме образца, недостаточная амплитуда РЧ поля, “неидеальности” приемного тракта, наиболее заметной из которых является неортогональность напряжений Синтезатора, поступающих на смесители SIN и COS каналов. По порядку величины для подавляющего числа случаев величина данной погрешности  $\delta_{СП}$  не превышает  $10^{-3}$  от ширины спектра сигнала  $\Delta F_C$ .

Итоговую **максимальную погрешность относительных измерений** можно представить в виде суммы трех основных погрешностей:

$$\delta_{ОТН} \cong \delta_{Ш} + \delta_{СП} + \delta_{СИИТ} \cong 3 \cdot (\sigma_F)_1 / (F_{ЯМР} \cdot \sqrt{T_{И}}) + 10^{-3} \cdot \Delta F_C + \delta_{СИИТ}, \quad (4)$$

где  $\delta_{Ш}$  – максимальная погрешность измерения, вызванная шумами;

$T_{И}$  – время одного измерения;

$\delta_{СИИТ}$  – погрешность измерения из-за нестабильности частоты Синтезатора.

## 6. Результаты

Приведем значения достигнутой точности измерения магнитного поля для трех случаев, охватывающих различные типы задач:

- 1) измерения однородного поля при комнатной температуре;
- 2) измерения однородного поля при температуре жидкого гелия;
- 3) измерения малых полей при комнатной температуре.

### 6.1. Измерения поля калибровочного магнита стенда магнитных измерений ИЯФ

На Рис.11 приведены экспериментально полученные зависимости среднеквадратичной погрешности измерения  $(\sigma_F)_1$ , вызванной шумами, от индукции измеряемого поля, полученные в калибровочном магните стенда магнитных измерений ИЯФ для трех различных датчиков ЯМР:

- 1) датчик №1: рабочее вещество – вода, объем образца  $\sim 80 \text{ мм}^3$ ;
- 2) датчик №2: рабочее вещество – вода, объем образца  $\sim 4 \text{ мм}^3$ ;
- 3) датчик №3: рабочее вещество – резина, объем образца  $\sim 1 \text{ мм}^3$ .

Среднеквадратичная погрешность  $(\sigma_F)_1$  находилась на основе измеренных параметров сигналов ЯМР. Погрешность  $(\sigma_F)_1$  уменьшается с ростом поля, некоторое увеличение ее в конце диапазона связано с резким ухудшением однородности поля. В средней части диапазона погрешность  $(\sigma_F)_1$  для датчиков на основе воды составляет величину порядка  $10^{-8}$ . Причем датчик с меньшим в 20 раз объемом рабочего вещества (датчик №2) имеет меньшую погрешность.

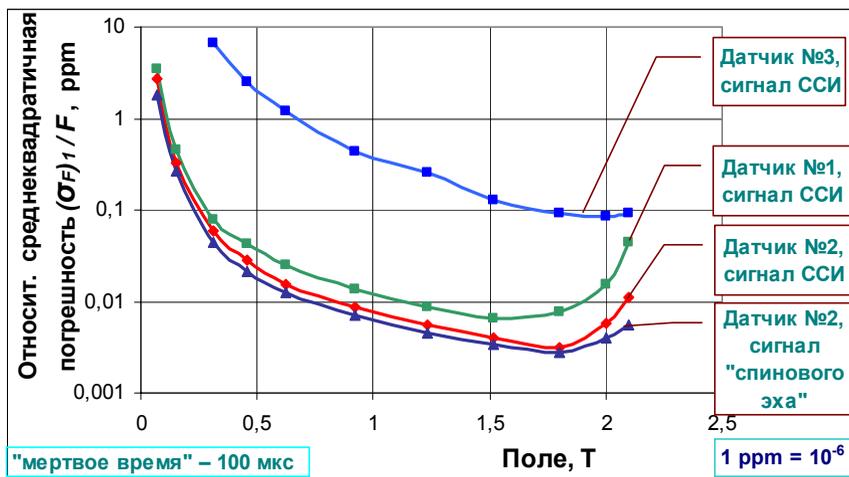


Рис. 11. Зависимости среднеквадратичной погрешности измерения  $(\sigma_F)_1$  от индукции измеряемого поля, полученные в калибровочном магните стенда магнитных измерений ИЯФ для трех датчиков ЯМР.

Датчик на основе резины имеет примерно на порядок большую погрешность, главным образом, из-за малого времени поперечной релаксации.

Наилучшая точность измерений достигнута с датчиком №2, имеющего объем образца около  $4 \text{ мм}^3$ . Максимальную погрешность относительных измерений магнитного поля  $\delta_{ОТН}$  с данным датчиком в диапазоне полей  $0,6 \div 1,8 \text{ Т}$  можно представить в следующем виде:

$$\delta_{ОТН} \cong (1 \div 3) \cdot 10^{-8} / \sqrt{T_{И}} + (3 \div 5) \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta T_O + \delta_{ВРЕМ} ,$$

где  $\Delta T_O$  – изменение температуры окружающей среды в месте расположения магнитометра;

$\delta_{ВРЕМ}$  – нестабильность частоты Синтезатора во времени (при постоянной температуре), величина  $\delta_{ВРЕМ}$  не превышает за  $3 \times 10^{-8}$  сутки и  $10^{-6}$  за год.

## 6.2. Измерения поля сверхпроводящего соленоида при температуре жидкого гелия

На Рис.12 приведена экспериментально полученная зависимость среднеквадратичной погрешности измерения  $(\sigma_F)_1$ , вызванной шумами, от индукции измеряемого поля, полученная в сверхпроводящем соленоиде (фокусирующем соленоиде для ВЭПП-2000) при температуре жидкого гелия для датчика на основе порошка алюминия с объемом образца около  $2 \text{ мм}^3$ .

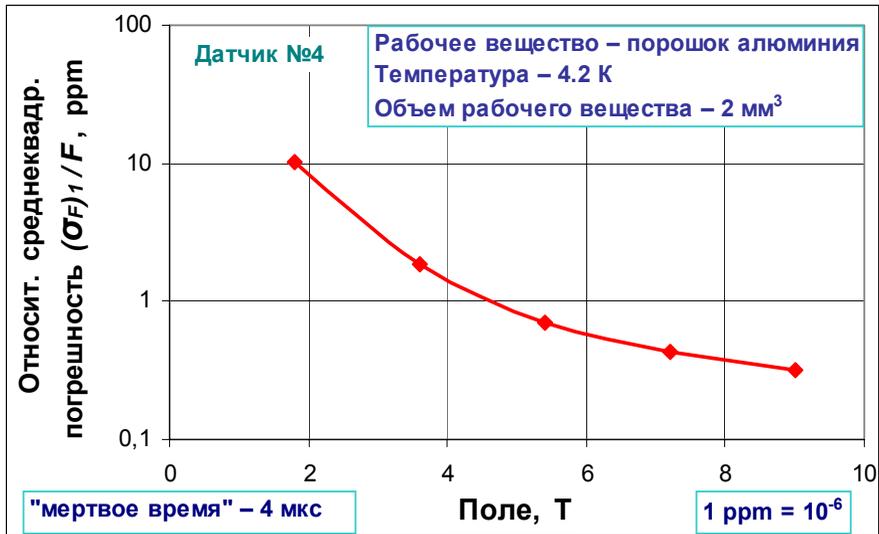


Рис. 12. Зависимость среднеквадратичной погрешности измерения  $(\sigma_F)_1$  от индукции измеряемого поля, полученная в сверхпроводящем соленоиде при температуре жидкого гелия.

Здесь среднеквадратичная погрешность  $(\sigma_F)_1$  на полях более 3 Т составляет величину порядка  $10^{-6}$ . Максимальную погрешность относительных измерений магнитного поля  $\delta_{ОГН}$  с данным датчиком в диапазоне полей 4÷12 Т можно представить в следующем виде:

$$\delta_{ОГН} \cong (0.3 \div 1) \cdot 10^{-6} / \sqrt{T_H} + (2 \div 4) \cdot 10^{-7} + 5 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta T_O + \delta_{ВРЕМ} .$$

### 6.3. Измерения слабых полей

На Рис.13 представлены результаты измерения поля 45-градусного магнита установки электронного охлаждения (Fermilab, США) [10]. Одно и то же поле с индукцией  $\sim 320$  Гс измерялось двумя одинаковыми комплектами магнитометров в течение дня. Время одного измерения составляло 1 сек.

В качестве датчиков использовались датчики резонансного типа на основе воды с объемом образца около  $80 \text{ мм}^3$ , рабочий диапазон полей каждого датчика 270÷500 Гс. Как следует из полученных данных, максимальная погрешность относительных измерений магнитного поля  $\delta_{ОГН}$  составляет величину порядка  $10^{-6}$ .

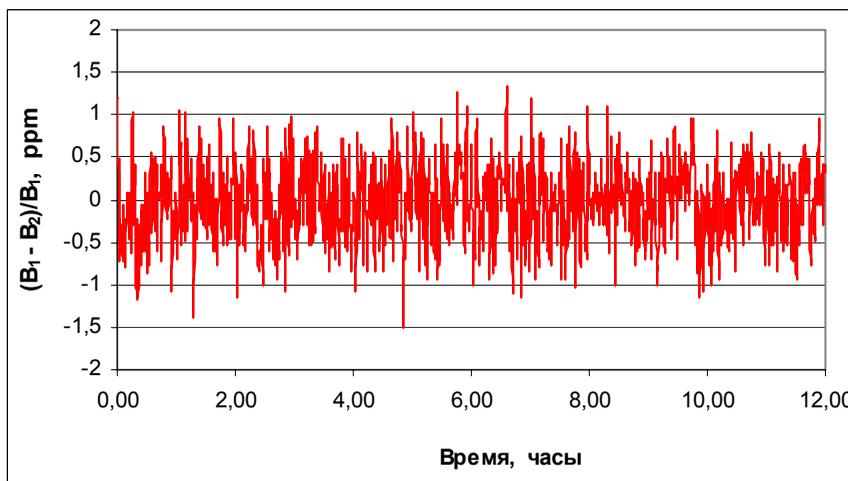
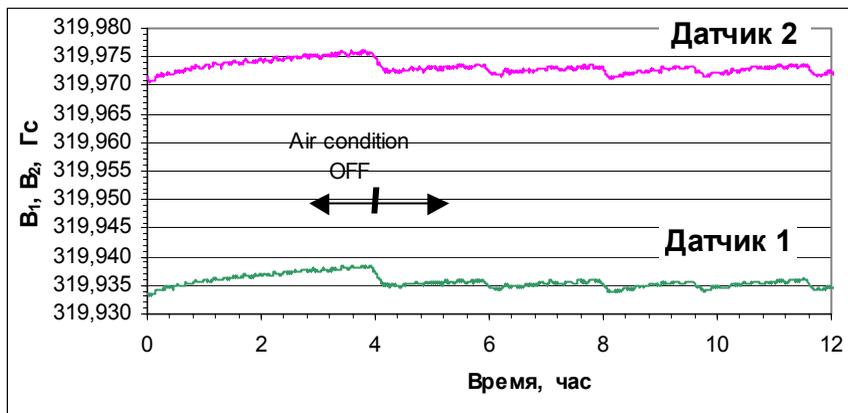


Рис.13 Результаты измерения одного и того же поля двумя одинаковыми магнитометрами (вверху) и относительная разность показаний магнитометров (внизу).

## 7 Заключение

В настоящее время изготовлено десять ЯМР магнитометров в стандарте VME. Данные магнитометры успешно работают на различных физических установках в ИЯФ и в других научных центрах. Разработанное программное обеспечение магнитометров для операционных систем VxWorks и Linux достаточно легко интегрируется в системах управления и сбора данных установок.

## Литература

- [1] *Зиневич Н.И., Карпов Г.В., Медведко А.С. и др.* Система измерения магнитного поля детектора КМД-2 методом ЯМР // Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 3-5 октября, 1990. – Дубна: ОИЯИ, 1992. Т.1. с.89-90.
- [2] *G.V. Karpov, A.S. Medvedko, et al.* NMR system for magnetic field measurements at the MARK-3 free electron laser // Proc. of the 5-th European Particle accelerator conference, Barselona, 10-14 June, 1996, v.3, p.2541-2542.
- [3] *V.M. Borovikov, M.G. Fedurin, G.V. Karpov et. al.* Precise NMR measurement and stabilization system of magnetic field of a superconducting 7T wave length shifter // Nucl. Instr. and Methods in Physics Research. – 2001, A 467-468, p.198-201.
- [4] *Р. Эрнст и др.* ЯМР в одном и двух измерениях / Р.Эрнст, Дж.Боденхаузен, А.Вокаун. – М.: Мир, 1990, 710 с.
- [5] *C. Reymond.* Magnetic Resonance techniques. // Cern Acceleration School. – Anacapri, Italy, 1998. – CERN 98-05, p.219-231.
- [6] *Дж. Эмсли.* Элементы. – М.: Мир, 1993. 256 с.
- [7] *Р. Хиггинс, Ю. Чанг.* Простой ЯМР датчик для градуировки сверхпроводящих соленоидов. // Приборы для научных исследований, №4, 1968, с.82-83.
- [8] *Ядерный магнитный резонанс: Учебное пособие / П.М.Бородин, М.И.Володичева, В.В.Москалев и др.; Под ред. Бородина П.М. – Ленинград: Издательство Ленинградского Университета, 1982. 344с.*
- [9] *Шубин Е.И.* Широкополосный синтезатор частоты прямого синтеза в стандарте VME. – Новосибирск, 1999. – 10 с. – (Препринт / Ин-т ядер. физики СО РАН; 99-113).
- [10] *A. Shemyakin, A. Burov, A.C. Crawford et al.* Status of the Fermilab electron cooling project. // Proc. of the 7-th European Particle accelerator conference, Vienna, 26-30 June, 2000, v.2, p.1265-1267.

*Г.В. Карпов, А.С. Медведко, Е.И. Шубин*

**Прецизионные магнитометры на основе ЯМР  
в стандарте VME**

*G.V. Karpov, A.S. Medvedko, E.I. Shubin*

**Precise magnetometers on base of NMR  
in VME standard**

ИЯФ 2004-55

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 9.07.2004

---

Сдано в набор 12.07.2004  
Подписано в печать 14.07.2004  
Формат 60x90 1/16 Объем 1.3 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.  
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 55

---

*Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*