

Д13-2006-161

С. А. Ивашкевич*

ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ В ЯДЕРНОМ
МАГНИТОМЕТРЕ

*E-mail: kazakova@jinr.ru

Ивашкевич С. А.

D13-2006-161

Частотная модуляция в ядерном магнитометре

На базе конкретной схемы ядерного магнитометра с полевой модуляцией предлагается вариант магнитометра с частотной модуляцией. Указаны недостатки полевой и достоинства частотной модуляции.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Ivashkevich S. A.

D13-2006-161

Frequency modulation in nuclear magnetometer

A version of the frequency-modulation magnetometer based on a particular design of the field-modulation nuclear magnetometer is proposed. Disadvantages of field modulation and advantages of frequency modulation are pointed out.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

В 2006 г. исполнилось 60 лет открытию замечательного физического явления — ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Это открытие быстро нашло широкое применение во многих отраслях науки и техники, включая магнитометрию [1–3].

Главное достоинство магнитометров с использованием ЯМР (ядерных магнитометров) — высокая точность измерения индукции B магнитного поля. Суть этого можно объяснить просто.

Если некоторое рабочее вещество поместить в измеряемое поле и перпендикулярно этому полю воздействовать на него еще высокочастотным полем с частотой ω , то может произойти резкий переход ядер вещества из одного энергетического состояния в другое. Это произойдет при $\omega = \gamma B$ — резонансном условии ЯМР. Здесь γ — гиромагнитное отношение ядер рабочего вещества. Наблюдать и использовать результаты переходов можно с помощью радиотехнических средств.

В ядерных магнитометрах обычно используются вещества, которые содержат ядра водорода (протоны). Протонный резонанс позволяет получать наиболее интенсивный сигнал ЯМР и в результате достигать лучших характеристик прибора.

Гиромагнитное отношение ядер водорода известно с точностью приблизительно $5 \cdot 10^{-6}$. Частоту современными методами можно измерить еще точнее. Поэтому, зафиксировав с достаточной точностью резонанс, измерив при этом ω и зная γ , можно с высокой точностью вычислить B .

Существует несколько разновидностей ЯМР-метода. В магнитометрах для измерений B выше, скажем, сотых долей тесла чаще всего используется метод, согласно которому высокочастотное поле создается катушкой индуктивности L колебательного контура LC-автогенератора. Рабочее вещество при этом находится внутри этой катушки. ЯМР посредством катушки влияет на генерируемое напряжение, уменьшая, в частности, его амплитуду, что потом фиксируется. Это так называемый режим выделения резонансного сигнала поглощения. Именно такой разновидности ЯМР-метода посвящено данное сообщение.

Чтобы иметь сигнал ЯМР, удобный для использования, в магнитометре осуществляется периодическое прохождение резонансного условия, получая таким образом периодическую последовательность импульсных сигналов поглощения. Это можно сделать двояко: изменяя (модулируя) B или ω . В первом случае измеряемое поле модулируется путем наложения на него мо-

дулирующего поля B_M , создаваемого специальной катушкой L_M , питаемой, например, синусоидальным током. Модуляцию ω проще всего осуществить, добавляя синусоидальное напряжение с амплитудой U_M к напряжению U , с помощью которого перестраивается ω для создания резонансных условий. Перестройка обычно осуществляется емкостью C варикапов, включенных в колебательный контур автогенератора. Таким образом, на варикапы надо подавать сумму двух напряжений: U и с U_M . Подробнее метод описан в вышеуказанных и других публикациях.

В подавляющем большинстве известных магнитометров используется полевая модуляция. Частотная модуляция применяется очень редко. Это связано, видимо, с тем, что модуляция частоты сопровождается еще и модуляцией амплитуды генерируемого автогенератором напряжения. Эту последнюю следует считать паразитной, в отличие от рабочей амплитудной модуляции, вызываемой ЯМР. Паразитная модуляция реально в несколько раз превосходит рабочую.

Несмотря на указанный недостаток частотной модуляции, а есть у нее и другие, было решено отказаться от полевой модуляции в пользу частотной, поставив при этом задачу избавиться от всех ее недостатков. Главная причина отказа от полевой модуляции — это стремление сделать автогенератор как можно более высокочастотным, чтобы можно было применить протонный резонанс в измерениях полей с большой индукцией, не переходя на использование ядер с меньшими резонансными частотами, но при этом и с меньшими интенсивностями сигналов ЯМР, что нередко делается. Кроме того, высокочастотность автогенератора очень нужна для магнитометра, о котором говорится в [4]. В [4] показана реальная возможность создания прибора с широким и непрерывным диапазоном измеряемых полей, в котором для измерений высоких полей используются ЯМР, а для низких — ЭПР (электронный парамагнитный резонанс).

В магнитометрах с полевой модуляцией катушка L располагается внутри катушки L_M . Это увеличивает расстояние от катушки L до остальной части генератора, что ограничивает его высокочастотность. В магнитометрах с частотной модуляцией это расстояние можно сделать минимально коротким.

Прежде чем перейти к описанию того, как можно реализовать частотную модуляцию, не лишним будет отметить еще несколько недостатков полевой модуляции. Наличие L_M увеличивает габаритные размеры датчика, что затрудняет применение магнитометра для измерений полей в плоских магнитах с узкими зазорами и в соленоидах с небольшими внутренними диаметрами. Для питания L_M нужен сравнительно мощный источник тока, к которому предъявляются еще и особые требования [5]. Кроме того, надо всегда соблюдать определенную направленность между модулирующим и измеряемым полями — требование, которое в некоторых конструкциях измерительных

устройств бывает непросто выполнить. С частотной модуляцией этой проблемы нет вообще.

Ниже предлагается вариант реализации частотной модуляции на базе магнитометра, в котором использовалась полевая модуляция. Этот прибор описан в [6], поэтому здесь будут отмечены только те изменения в нем, которые связаны с переходом на частотную модуляцию. Принципиальная схема нового прибора показана на рисунке. Перечень используемых в нем микросхем, транзисторов и диодов помещен в конце текста.

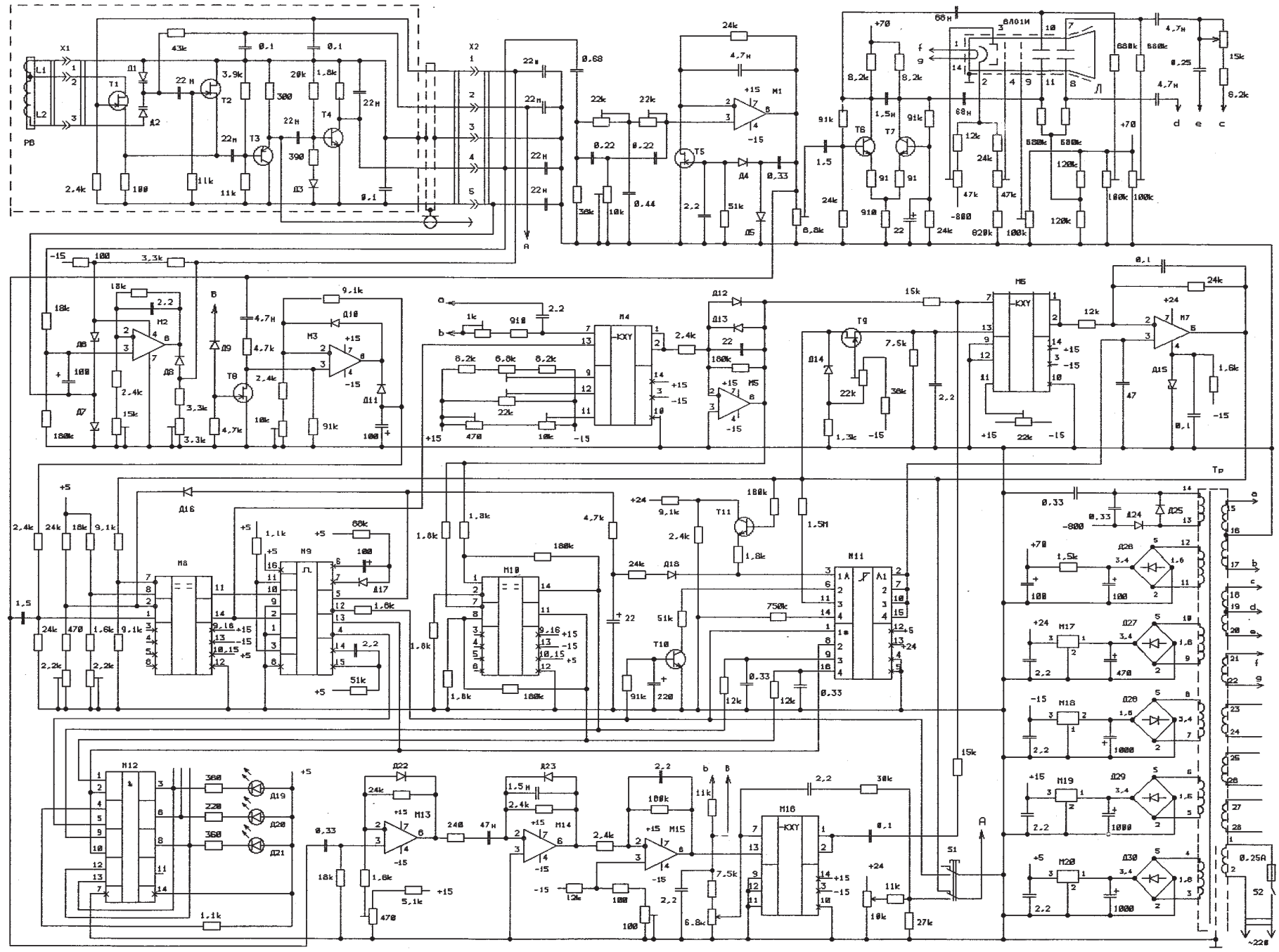
С переходом на частотную модуляцию возникает вопрос: не вносит ли она заметную погрешность в измерение резонансной частоты? При используемых величинах модуляции ответ на этот вопрос отрицательный. Ответ дает сравнение показаний частотомера с включенной и выключенной частотной модуляцией. Для этого использовался частотомер [7], входящий в состав магнитометра. В нем измеряемые частоты ω автоматически пересчитываются в соответствующие им значения полей B . Величина измеряемого поля в теслах отображается на цифровом дисплее и может передаваться в компьютер с помощью схемы [8], которая тоже входит в состав магнитометра.

Для частотной модуляции нужна «чистая» синусоида, т. е. без искажений и помех. Поэтому в схеме используемое для модуляции напряжение с обмотки сетевого трансформатора как исходное вначале фильтруется и только потом используется по назначению. Достаточное качество фильтрации обеспечивает простейший RC-фильтр низких частот.

Первостепенная задача при переходе на частотную модуляцию — нейтрализация паразитной модуляции. В предлагаемой схеме эта задача решается путем пропускания сигнала с амплитудного детектора (Т4) в датчике магнитометра через режекторный фильтр с двойным Т-образным мостом. Элементы фильтра должны быть стабильными, а сам он — тщательно настроенным на максимальное подавление паразитной модуляции. Схемы такого фильтра описаны во многих учебниках и книгах по электронике.

Следующая задача — это устранение недостатков, связанных с нелинейной зависимостью емкости варикапов от напряжения на них. Ясно, что при неизменной амплитуде U_M величина модуляции будет изменяться вместе с изменением C , т. е. вместе с U . Поэтому при широком диапазоне изменений U надо обязательно иметь регулировку U_M в зависимости от U .

В магнитометре в схеме поиска резонанса и точной настройки на него есть автоматическая регулировка напряжения, управляющего настройкой. Она обусловлена той же нелинейностью. Теперь к ней добавляется еще регулировка модулирующего напряжения. Оба этих напряжения суммируются на одном из входов аналогового перемножителя М6. На другом входе М6 (регулирующем) для улучшения качества регулирования используются два нелинейных элемента (Т9, Д14), подобранных и настроенных с учетом характеристик используемых варикапов и принятого диапазона U .



И, наконец, надо было решить еще одну важную задачу, связанную с регулировкой U_M в зависимости от величины B . В магнитометре с полевой модуляцией для оптимизации точной настройки на резонанс, кроме автоматической регулировки B_M в зависимости от неоднородности B , применяется также и ступенчатое изменение B_M в зависимости от величины B . В каждой сменной головке датчика L_M разные. В [5] показано, что поля B_M , создаваемые катушками L_M , должны увеличиваться вместе с B .

Используя расчетные соотношения и рассуждения из [5] и [9], можно показать, что при частотной модуляции желательнее тоже иметь ступенчатую или иную дополнительную регулировку U_M в зависимости от B . Но здесь получается иначе: с увеличением B модулирующий сигнал надо уменьшать, а требуемый диапазон изменений этого сигнала существенно меньше, чем в случае с полевой модуляцией при одинаковых диапазонах измеряемых B .

Чтобы не вносить в схему дополнительные элементы ручного управления (например, переключатель), используется плавная регулировка U_M с помощью переменного резистора, положения движка которого имеют метки, соответствующие диапазонам полей B , определяемых сменными головками с L . Этот же резистор используется и для регулировки U_M в режиме ручной настройки на резонанс. Несмотря на то, что представляемый здесь прибор может работать полностью в автоматическом режиме, ручная настройка в нем сохранена. Такую настройку иногда полезно иметь. Об этом, а также о том, как реализуется такая настройка, говорится в [3].

Автоматическая регулировка U_M в зависимости от неоднородности B в новой схеме магнитометра сохранена в неизменном виде. Из нее исключен только мощный операционный усилитель, питавший L_M , который здесь уже не нужен.

Подводя итог сказанному, учитывая достоинства частотной модуляции, простоту решений возникших при этом задач в конкретной схеме магнитометра и учитывая отмеченные недостатки полевой модуляции, можно сделать вывод: в ядерных магнитометрах описанного типа предпочтение следует отдавать частотной модуляции.

Перечень использованных в принципиальной схеме микросхем, транзисторов и диодов: М1-М3, М5, М13-М15 – КР140УД708; М4, М6, М16 – 525ПС2; М7 – КР140УД22; М8, М10 – КР597СА3; М9 – К155АГ3; М11 – КР590Н5; М12 – К155ЛИ1; М17 – 7824; М18 – 7915; М19 – 7815; М20 – 7805; Т1, Т2 – J309; Т3 – КТ363БМ; Т4 – КТ355АМ; Т5 – КП307Б; Т6, Т7 – КТ503Е; Т8 – КП303Б; Т9 – КП303Е; Т10, Т11 – КТ315Д; Д1, Д2 – КВ121А; Д3 – КД512Б; Д4, Д5, Д8, Д9 – ГД508Б; Д6, Д15 – КС133А; Д7 – Д814А; Д10-Д13, Д16-Д18, Д22, Д23 – КД503А; Д14 – КС211Ц; Д19, Д21 – АЛ336Б; Д20 – АЛ336И; Д24, Д25 – КЦ106Г; Д26-Д30 – КЦ407А.

В заключение автор искренне благодарит Г. А. Карамышеву, прочитавшую рукопись и сделавшую полезные замечания, Г. Г. Казакову и И. В. Ев-

сееву за помощь в оформлении рукописи, сотрудников издательского отдела ОИЯИ Т. Я. Жабицкую и Э. В. Ивашкевич за редактирование статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лёше А.* Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963.
2. *Афанасьев Ю. В. и др.* Средства измерения параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
3. *Ивашкевич С. А.* Автоматический широкодиапазонный ядерный магнитометр. Сообщение ОИЯИ 13-80-130. Дубна, 1980.
4. *Ивашкевич С. А.* Высокочастотный датчик для ЯМР- и ЭПР-магнитометров. Препринт ОИЯИ Р13-2002-242. Дубна, 2002.
5. *Ивашкевич С. А.* Схема автоматической регулировки модулирующего поля для ядерного магнитометра. Сообщение ОИЯИ Р13-96-196. Дубна, 1996.
6. *Ивашкевич С. А.* Широкодиапазонный ядерный магнитометр с автоматическими регулировками. Сообщение ОИЯИ Д13-2001-26. Дубна, 2001.
7. *Ивашкевич С. А.* Частотомер для ядерных магнитометров. Сообщение ОИЯИ Р13-98-309. Дубна, 1998.
8. *Кортаев Ю. В.* Плата сопряжения ядерного магнитометра и ПК. Сообщение ОИЯИ Р13-99-23. Дубна, 1999.
9. *Ивашкевич С. А.* Схема автоматической настройки на резонанс в ядерном магнитометре. Сообщение ОИЯИ 13-84-566. Дубна, 1984.

Получено 28 ноября 2006 г.

Редактор *Т. Я. Жабицкая*

Подписано в печать 15.1.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,75. Тираж 235 экз. Заказ № 55631

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/